

CARACTERIZACIÓN DINÁMICA PRELIMINAR DE SUELOS EN SECTORES DE LA
CIUDAD DE SAN JUAN DE PASTO MEDIANTE EL MÉTODO DE
MICROTREPIDACIONES PROPUESTO POR NAKAMURA.

ANDRÉS GEOVANNY HILLÓN SARMIENTO
EDITH LORENA NARVÁEZ MERA.

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO

2008

CARACTERIZACIÓN DINÁMICA PRELIMINAR DE SUELOS EN SECTORES DE LA
CIUDAD DE SAN JUAN DE PASTO MEDIANTE EL MÉTODO DE
MICROTREPIDACIONES PROPUESTO POR NAKAMURA.

ANDRÉS GEOVANNY HILLÓN SARMIENTO
EDITH LORENA NARVÁEZ MERA

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

Director
HUGO CORAL MONCAYO I.C. M.Sc. Ph.D

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO

2008

“Las ideas, conclusiones aportadas en la tesis de grado son responsabilidad exclusiva de los autores”

Artículo 1° del acuerdo N 324 de octubre 11 de 1966, emanado por el honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de aceptación:

Firma Director

Firma del Jurado

Firma del jurado

San Juan de Pasto, febrero de 2008.

A:

Mis padres, Julio^t y Norka

Mis hermanos, Andrés

Mis familiares y amigos

A:

Mis padres, Luis y Clara

Mis familiares y amigos

AGRADECIMIENTOS

En el desarrollo de la investigación interactuamos con diferentes instituciones, profesionales y amigos, que hicieron posible el desarrollo de la investigación, a todos ellos citamos reiterando infinitas gracias:

Instituciones:

A la Universidad de Nariño, por orientarnos en la parte académica y realización del trabajo de investigación.

Al Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS), por el préstamo de los equipos para realizar las campañas de medición de microtrepidaciones.

A las directivas del Hospital Departamental, Estadio Libertad, Parque Infantil, Universidad de Nariño, Colegio Bethlemitas, Empopasto, Colegio INEM, SENA y Colegio Libertad, por permitirnos la entrada a sus instalaciones para la toma de registros de microtrepidaciones, tanto diurnas como nocturnas.

Profesionales y amigos:

Al Dr. Hugo Coral Moncayo, por su orientación, entusiasmo y apoyo en todo momento, no sólo como profesional sino también personal, además por dedicarnos parte de su tiempo en la dirección de este trabajo, a pesar de sus múltiples ocupaciones.

Al geólogo. Dario Llanos, por su ayuda en la campaña de ruido sísmico, en las instrucciones referentes al manejo de los equipos utilizados, por brindarnos su amistad y orientarnos en diferentes interrogantes del trabajo.

A los Ings. María Luisa Bermudez y Fernando Gil, por permitir fácilmente, el préstamo de los equipos para la campaña de microtrepidaciones por parte del Instituto Colombiano de Geología y Minería.

A Carlos Laverde, por su valioso apoyo en la extracción de los datos de microtrepidaciones y por su entusiasmo en el término de este proyecto.

A Francisco y Camilo, por brindarnos transporte y buena compañía en las frías noches pastusas, realizando registros de microsismos.

A todos nuestros familiares y amigos que de alguna forma nos apoyaron y colaboraron en el desarrollo de este trabajo.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-------------|---|-----|
| FIGURA 1.1 | Espectro de aceleraciones promedio para diferentes condiciones..... | 025 |
| FIGURA 2.1 | Localización geográfica..... | 028 |
| FIGURA 2.2 | Plancha geológica 429 INGEOMINAS..... | 029 |
| FIGURA 2.3 | Lineamientos de falla influyentes en el departamento de Nariño..... | 030 |
| FIGURA 2.4 | Sismicidad registrada por la Red Sismológica Nacional de Colombia 1993 – 2006..... | 032 |
| FIGURA 3.1 | Tipos de ondas (Ondas de volumen - Ondas superficiales)..... | 035 |
| FIGURA 3.2 | Formas de onda..... | 037 |
| FIGURA 3.3 | Función de transferencia..... | 039 |
| FIGURA 3.4 | Función de transferencia por la geología..... | 040 |
| FIGURA 3.5 | Funciones de transferencia de la medición..... | 040 |
| FIGURA 3.6 | Diagrama de los factores que influyen en el movimiento vibratorio del Terreno registrado en un punto (fuente-medio-estación). (Hays, 1989)..... | 041 |
| FIGURA 3.7 | Esquema del comportamiento del medio en la propagación de las ondas sísmicas, atendiendo a la relación entre la longitud de ondas γ , y la distancia de correlación entre heterogeneidades δ . (Herraiz y Espinosa, 1986)..... | 044 |
| FIGURA 3.8 | Métodos y técnicas disponibles para el análisis de la respuesta del suelo y la zonificación sísmica de una región..... | 047 |
| FIGURA 4.1 | Localización geográfica sectores de medición..... | 052 |
| FIGURA 4.2 | Correlaciones de Vs con el ensayo de penetración estándar según diversos estudios..... | 056 |
| FIGURA 4.2 | Correlaciones de Vs con el ensayo de penetración estándar según diversos estudios. (Continuación..... | 057 |
| FIGURA 4.2 | Correlaciones de Vs con el ensayo de penetración estándar según diversos estudios. (Continuación)..... | 058 |
| FIGURA 4.2 | Correlaciones de Vs con el ensayo de penetración estándar según diversos estudios. (Continuación)..... | 059 |
| FIGURA 4.3 | Estratigrafía y parámetros dinámicos sector Estadio Libertad..... | 060 |
| FIGURA 4.4 | Movimiento de ondas “P” y “S”..... | 061 |
| FIGURA 4.5 | Modelo columna de suelo..... | 063 |
| FIGURA 5.1 | Relación espectral con un sitio de referencia..... | 074 |
| FIGURA 6.1 | Esquema general para el registro de microtrepidaciones..... | 091 |
| FIGURA 6.2 | Sensor de velocidad GURALP CMG-40T y Breakbox..... | 092 |
| FIGURA 6.3 | Unidad de digitalización Nanometrics y Disco duro..... | 093 |
| FIGURA 6.4 | Acelerómetro ETNA (Interior - Exterior)..... | 093 |
| FIGURA 6.5 | Localización puntos de medición..... | 097 |
| FIGURA 6.6 | Procedimiento para obtener la relación espectral H/V (Rosales, 2001)... | 110 |
| FIGURA 6.7 | Ventana principal y menú de configuración..... | 111 |
| FIGURA 6.8 | Parámetros de selección automática de ventanas..... | 111 |
| FIGURA 6.9 | Parámetros del módulo de procesamiento de la relación espectral H/V y opciones de filtros..... | 111 |
| FIGURA 6.10 | Parámetros generales y opciones del proyecto..... | 112 |
| FIGURA 6.11 | Vista en zoom de las trazas con las ventanas seleccionadas..... | 112 |
| FIGURA 6.12 | Opciones de procesamiento..... | 112 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| FIGURA 6.13 | Relación espectral para el promedio de las componentes horizontales y relación espectral para cada componente horizontal NS y EW..... | 113 |
| FIGURA 6.14 | Resultado para ventanas individuales..... | 113 |
| FIGURA 6.15 | Ejemplo de lectura del pico fundamental de la señal 2, en el sector del Estadio Libertad..... | 114 |
| FIGURA 6.16 | Distribución de los periodos resultantes..... | 123 |
| FIGURA 7.1 | Propagación vertical de ondas de cizalla de un medio unidimensional semi-infinito estratificado en capas planas. (Coral, 2002)..... | 125 |
| FIGURA 7.2 | Representación esquemática del funcionamiento del programa ProShake. (Coral, 2002)..... | 125 |
| FIGURA 7.3 | Diagrama de flujo donde se muestra el funcionamiento del programa ProShake (Coral, 2002)..... | 126 |
| FIGURA 7.4 | Organización del programa ProShake (Coral, 2002)..... | 127 |
| FIGURA 7.5 | Ventana de ingreso de datos del perfil de suelo..... | 127 |
| FIGURA 7.6 | Ventana de resumen de la información de entrada..... | 128 |
| FIGURA 7.7 | Ventana del perfil de suelo y sus características y solicitudes de resultados..... | 128 |
| FIGURA 7.8 | La ventana muestra las propiedades de las señales de entrada..... | 129 |
| FIGURA 7.9 | Historia de aceleraciones en superficie para un determinado estrato de suelo de uno de los perfiles analizados..... | 130 |
| FIGURA 7.10 | Se muestra un espectro de respuesta obtenido para un determinado estrato y amortiguamiento..... | 131 |
| FIGURA 7.11 | Función de transferencia suelo/roca para uno de los perfiles analizados..... | 131 |
| FIGURA 7.12 | Pulsos de Ricker para los perfiles en estudio..... | 132 |
| FIGURA 7.13 | Perfil Sector Torres Valle de Atriz con la información suministrada y solicitada..... | 134 |
| FIGURA 7.14 | Gráficas de variación de módulos de cizalla y factores de amortiguamientos con la deformación considerados en los cálculos para los perfiles en estudio..... | 134 |
| FIGURA 7.14 | Gráficas de variación de módulos de cizalla y factores de amortiguamientos con la deformación considerados en los cálculos para los perfiles en estudio. (Continuación)..... | 135 |
| FIGURA 7.14 | Gráficas de variación de módulos de cizalla y factores de amortiguamientos con la deformación considerados en los cálculos para los perfiles en estudio. (Continuación)..... | 136 |
| FIGURA 7.15 | Registros de aceleración obtenidos en el limo (ML) a la profundidad de 0,0 m a 5,5 m del perfil sector Torres Valle de Atriz..... | 137 |
| FIGURA 7.16 | Registros de aceleración obtenidos en el limos (ML) a la profundidad de 5,5 m a 7,5 m, del perfil sector Torres Valle de Atriz..... | 137 |
| FIGURA 7.17 | Registros de aceleración obtenidos en arena limosa (SM) a la profundidad de 7,5 m a 11,65 m, del perfil sector Torres Valle de Atriz..... | 138 |
| FIGURA 7.18 | Espectro de respuesta en superficie y roca para el perfil sector Torres Valle de Atriz, considerando como registros de entrada en estrato resistente pulsos de Ricker de 2, Hz..... | 138 |
| FIGURA 7.19 | Espectro de respuesta en superficie y roca para el perfil sector Torres Valle de Atriz, considerando como registros de entrada en estrato resistente pulsos de Ricker de 5, y 7 Hz..... | 139 |
| FIGURA 7.20 | Función de transferencia en superficie sector Torres Valle de Atriz..... | 140 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| FIGURA 7.21 | Resultado obtenido de la aplicación del programa ProShake para el acelerograma 000044za y el perfil del sector Torres Valle de Atriz..... | 144 |
| FIGURA 7.22 | Función de transferencia para todas las señales y el perfil del sector Torres Valle de Atriz..... | 145 |
| FIGURA 8.1 | Espectro elástico de diseño – NSR-98..... | 155 |
| FIGURA 8.2 | Descripción perfil S1 – NSR-98..... | 157 |
| FIGURA 8.3 | Descripción perfil S2 – NSR-98..... | 157 |
| FIGURA 8.4 | Descripción perfil S3 – NSR-98..... | 158 |
| FIGURA 8.5 | Descripción perfil S4 – NSR-98..... | 158 |
| FIGURA 8.6 | Espectros de respuesta en superficie – Amortiguamiento 5%. Sector Aquine..... | 161 |
| FIGURA 8.7 | Resultados de Aa para cada coeficiente de importancia y datos de interés para cada uno de los perfiles en análisis..... | 162 |
| FIGURA 8.8 | Espectro elástico de diseño a partir de la NSR-98 – Amortiguamiento 5%, Sector Torres Valle de Atriz (S=1,5)..... | 163 |
| FIGURA 8.9 | Proceso esquemático para obtener el espectro de un perfil de suelo..... | 165 |
| FIGURA 8.10 | Valores de Fa en función de las condiciones locales y nivel de intensidad sísmica para cada tipo de perfil de suelo (S1 y S2)..... | 166 |
| FIGURA 8.11 | Valores de Fa en función de las condiciones locales y nivel de intensidad sísmica para cada tipo de perfil de suelo (S3 y S4)..... | 167 |
| FIGURA 8.12 | Valores de Fv en función de las condiciones locales y nivel de intensidad sísmica para cada tipo de perfil de suelo (S1 y S2)..... | 167 |
| FIGURA 8.13 | Valores de Fv en función de las condiciones locales y nivel de intensidad sísmica para cada tipo de perfil de suelo (S3 y S4)..... | 167 |
| FIGURA 8.14 | Valores de Fa para cada perfil en análisis..... | 168 |
| FIGURA 8.15 | Valores de Fv para cada perfil en análisis..... | 168 |
| FIGURA 8.16 | Valores de Fa y Fv Sector Aquine..... | 169 |
| FIGURA 8.17 | Valores de coeficiente de sitio (S), velocidad de ondas de corte (Vs), aceleración pico efectiva (Aa), periodo inicial (To), periodo corto (Tc), periodo largo (TL), Fa y Fv para cada sector..... | 169 |
| FIGURA 8.18 | Valores de Fa y Fv para todos los sectores con nivel de intensidad sísmica Aa = 0,30g..... | 170 |
| FIGURA 8.19 | Valores de coeficiente de sitio (S), velocidad de ondas de corte (Vs), periodo inicial (To), periodo corto (Tc), periodo largo (TL), Fa y Fv para cada sector con un nivel de intensidad sísmica de Aa = 0,30g..... | 171 |
| FIGURA 8.20 | Comparación espectros de diseño obtenidos Sector Aquine..... | 172 |
| FIGURA 8.21 | Comparación espectros de diseño obtenidos Sector Aranda..... | 172 |
| FIGURA 8.22 | Comparación espectros de diseño obtenidos Sector Colegio Bethlemitas..... | 173 |
| FIGURA 8.23 | Comparación espectros de diseño obtenidos Sector Colegio Libertad... | 173 |
| FIGURA 8.24 | Comparación espectros de diseño obtenidos Sector Hospital Departamental..... | 174 |
| FIGURA 8.25 | Comparación espectros de diseño obtenidos Sector Empopasto Centenario..... | 174 |
| FIGURA 8.26 | Comparación espectros de diseño obtenidos Sector Empopasto San Felipe..... | 175 |
| FIGURA 8.27 | Comparación espectros de diseño obtenidos Sector Estadio Libertad.... | 175 |
| FIGURA 8.28 | Comparación espectros de diseño obtenidos Sector Universidad de Nariño – Facultad de Artes..... | 176 |
| FIGURA 8.29 | Comparación espectros de diseño obtenidos Sector Universidad de Nariño – Facultad de Ingeniería..... | 176 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| FIGURA 8.30 | Comparación espectros de diseño obtenidos Sector Colegio INEM..... | 177 |
| FIGURA 8.31 | Comparación espectros de diseño obtenidos Sector Colegio San Francisco Javier – Primaria..... | 177 |
| FIGURA 8.32 | Comparación espectros de diseño obtenidos Sector Barrio La Paz..... | 178 |
| FIGURA 8.33 | Comparación espectros de diseño obtenidos Sector Morasurco..... | 178 |
| FIGURA 8.34 | Comparación espectros de diseño obtenidos Sector lote Colegio Nuevo Javeriano..... | 179 |
| FIGURA 8.35 | Comparación espectros de diseño obtenidos Sector Barrio Pandiaco.... | 179 |
| FIGURA 8.36 | Comparación espectros de diseño obtenidos Sector Dos Puentes..... | 180 |
| FIGURA 8.37 | Comparación espectros de diseño obtenidos Sector Plaza del Carnaval..... | 180 |
| FIGURA 8.38 | Comparación espectros de diseño obtenidos Sector Potrerillo..... | 181 |
| FIGURA 8.39 | Comparación espectros de diseño obtenidos Sector Parque Infantil..... | 181 |
| FIGURA 8.40 | Comparación espectros de diseño obtenidos Sector Sena..... | 182 |
| FIGURA 8.41 | Comparación espectros de diseño obtenidos Sector Barrio El Tejar..... | 182 |
| FIGURA 8.42 | Comparación espectros de diseño obtenidos Sector Torres Valle de Atriz..... | 183 |
| FIGURA 9.1 | Distribución de los periodos resultantes a partir de análisis de Microtrepidaciones..... | 184 |
| FIGURA 9.2 | Distribución de los periodos resultantes a partir del programa ProShake - Pulsos de Ricker..... | 186 |
| FIGURA 9.3 | Distribución de los periodos resultantes a partir del programa ProShake - Sismos diferentes valores de magnitud local..... | 187 |
| FIGURA 9.4 | Distribución de las Aceleraciones Pico Efectivas en los 23 sectores en estudio..... | 188 |

LISTA DE TABLAS

| | | |
|------------|--|-----|
| TABLA 3.1 | Periodos característicos de vibración de ondas sísmicas..... | 036 |
| TABLA 3.2 | Velocidades típicas de ondas P..... | 039 |
| TABLA 4.1 | Estudios geotécnicos seleccionados..... | 051 |
| TABLA 4.2 | Resumen estudio geotécnico No. 495 Sector Estadio Libertad..... | 052 |
| TABLA 4.3 | Resumen estudio geotécnico No. 523 Sector Torres Valle de Atriz..... | 053 |
| TABLA 4.4 | Estimación de los valores de densidad para los diferentes materiales de las zonas en estudio..... | 054 |
| TABLA 4.5 | Correlaciones de Vs con el ensayo de penetración estándar según diversos estudios..... | 055 |
| TABLA 4.6 | Parámetros dinámicos calculados a partir del ensayo de penetración estándar N _{spt} para el perfil sector Estadio Libertad..... | 060 |
| TABLA 4.7 | Cálculo del periodo del suelo con el método de las velocidades de corte para el perfil sector Estadio Libertad..... | 066 |
| TABLA 4.8 | Resumen resultados obtenidos con el método de las velocidades de Corte para los 23 sitios en estudio..... | 067 |
| TABLA 5.1 | Fuentes primarias de ondas sísmicas..... | 069 |
| TABLA 5.2 | Clasificación de los suelos según la metodología de Kanai (1954)..... | 071 |
| TABLA 5.3 | Criterios para la selección de sitio de registro de microtrepidaciones según Stal & Westberg (1996)..... | 086 |
| TABLA 6.1 | Descripción de los registros obtenidos en el Hospital Departamental.... | 098 |
| TABLA 6.2 | Descripción de los registros obtenidos en el Estadio Libertad..... | 098 |
| TABLA 6.3 | Descripción de los registros obtenidos en el Barrio La Paz..... | 099 |
| TABLA 6.4 | Descripción de los registros obtenidos en el Barrio Pandiaco..... | 099 |
| TABLA 6.5 | Descripción de los registros obtenidos en el Parque Infantil..... | 099 |
| TABLA 6.6 | Descripción de los registros obtenidos en el Sector dos Puentes..... | 100 |
| TABLA 6.7 | Descripción de los registros obtenidos en la Plaza del Carnaval..... | 100 |
| TABLA 6.8 | Descripción de los registros obtenidos en Sector Potrerillo..... | 100 |
| TABLA 6.9 | Descripción de los registros obtenidos en el Barrio El Tejar..... | 101 |
| TABLA 6.10 | Descripción de los registros obtenidos en la Universidad de Nariño..... | 101 |
| TABLA 6.11 | Descripción de los registros obtenidos en las Torres de Valle de Atriz.... | 101 |
| TABLA 6.12 | Descripción de los registros obtenidos en el Colegio Bethlemitas..... | 102 |
| TABLA 6.13 | Descripción de los registros obtenidos en Empopasto Centenario..... | 102 |
| TABLA 6.14 | Descripción de los registros obtenidos en Empopasto San Felipe..... | 102 |
| TABLA 6.15 | Descripción de los registros obtenidos en el Colegio INEM..... | 103 |
| TABLA 6.16 | Descripción de los registros obtenidos en el Colegio San Francisco Javier – Primaria..... | 103 |
| TABLA 6.17 | Descripción de los registros obtenidos en el Sector Morasurco..... | 103 |
| TABLA 6.18 | Descripción de los registros obtenidos en el Barrio Nueva Aranda..... | 104 |
| TABLA 6.19 | Descripción de los registros obtenidos en el Lote del Colegio Nuevo Javeriano..... | 104 |
| TABLA 6.20 | Descripción de los registros obtenidos en el SENA..... | 104 |
| TABLA 6.21 | Descripción de los registros obtenidos en la Universidad de Nariño – Facartes..... | 105 |
| TABLA 6.22 | Descripción de los registros obtenidos en el Barrio Aquine..... | 105 |
| TABLA 6.23 | Descripción de los registros obtenidos en el Colegio Libertad..... | 105 |
| TABLA 6.24 | Resultados relación espectral H/V – Método de Nakamura..... | 116 |
| TABLA 6.24 | Resultados relación espectral H/V – Método de Nakamura (Continua)... | 117 |

| | | |
|------------|--|-----|
| TABLA 6.25 | Amplitudes resultantes de las mediciones de Nakamura..... | 118 |
| TABLA 6.25 | Amplitudes resultantes de las mediciones de Nakamura (continuación). | 119 |
| TABLA 6.26 | Tabla de amplitudes de f0 con respecto al sitio Colegio Libertad..... | 120 |
| TABLA 6.27 | Tabla de resumen valores de hn a partir de A.4.2 – NSR 98..... | 122 |
| TABLA 7.1 | Reporte del perfil sector Torres Valle de Atriz..... | 133 |
| TABLA 7.2 | Resultados obtenidos en superficie al aplicar ProShake a los 23 perfiles estratigráficos de la zona en estudio..... | 140 |
| TABLA 7.2 | Resultados obtenidos en superficie al aplicar ProShake a los 23 perfiles estratigráficos de la zona en estudio. (Continuación)..... | 141 |
| TABLA 7.2 | Resultados obtenidos en superficie al aplicar ProShake a los 23 perfiles estratigráficos de la zona en estudio. (Continuación)..... | 142 |
| TABLA 7.3 | Información general de los sismos seleccionados para análisis de los perfiles en estudio..... | 143 |
| TABLA 7.4 | Parámetros sísmicos obtenidos en superficie al aplicar ProShake a los 23 perfiles estratigráficos de la zona de estudio..... | 145 |
| TABLA 7.4 | Parámetros sísmicos obtenidos en superficie al aplicar ProShake a los 23 perfiles estratigráficos de la zona de estudio. (Continuación).... | 146 |
| TABLA 7.4 | Parámetros sísmicos obtenidos en superficie al aplicar ProShake a los 23 perfiles estratigráficos de la zona de estudio. (Continuación).... | 147 |
| TABLA 7.4 | Parámetros sísmicos obtenidos en superficie al aplicar ProShake a los 23 perfiles estratigráficos de la zona de estudio. (Continuación).... | 148 |
| TABLA 7.4 | Parámetros sísmicos obtenidos en superficie al aplicar ProShake a los 23 perfiles estratigráficos de la zona de estudio. (Continuación).... | 149 |
| TABLA 7.5 | Principales parámetros sísmicos en el basamento rocoso..... | 149 |
| TABLA 7.6 | Tabla de resumen valores de hn a partir de A.4.2 – NSR 98..... | 150 |
| TABLA 7.6 | Tabla de resumen valores de hn a partir de A.4.2 – NSR 98 (Continuación)..... | 151 |
| TABLA 7.6 | Tabla de resumen valores de hn a partir de A.4.2 – NSR 98 (Continuación)..... | 152 |
| TABLA 7.6 | Tabla de resumen valores de hn a partir de A.4.2 – NSR 98 (Continuación)..... | 153 |
| TABLA 7.6 | Tabla de resumen valores de hn a partir de A.4.2 – NSR 98 (Continuación)..... | 154 |
| TABLA 8.1 | Valores coeficiente de importancia – NSR-98..... | 156 |
| TABLA 8.2 | Valores coeficiente de sitio – NSR-98..... | 156 |
| TABLA 8.3 | Estimación tipo de perfil del suelo a partir de Vs (m/s) respecto a NSR-98..... | 159 |
| TABLA 8.3 | Estimación tipo de perfil del suelo a partir de Vs (m/s) respecto a NSR-98. (Continuación)..... | 160 |
| TABLA 8.3 | Estimación tipo de perfil del suelo a partir de Vs (m/s) respecto a NSR-98. (Continuación)..... | 161 |
| TABLA 8.4 | Clasificación de los perfiles y las formas espectrales considerando el efecto de sitio..... | 164 |
| TABLA 8.5 | Valores de Fa en función de las condiciones locales y nivel de intensidad sísmica..... | 165 |
| TABLA 8.6 | Valores de Fv en función de las condiciones locales y nivel de intensidad sísmica..... | 166 |
| TABLA 8.7 | Velocidad de ondas de corte de acuerdo al coeficiente de sitio S (NSR-98)..... | 166 |
| TABLA 8.8 | Valores de Fa para Nivel de intensidad sísmica (Aa = 0,30g)..... | 170 |
| TABLA 8.9 | Valores de Fv para Nivel de intensidad sísmica (Aa = 0,30g)..... | 170 |

RESUMEN

Teniendo en cuenta la amenaza sísmica a la que se encuentra sometida la ciudad de San Juan de Pasto, es necesario realizar estudios de análisis dinámico como herramienta fundamental para conocer la respuesta y comportamiento de los suelos frente a las ondas sísmicas.

La presente investigación muestra la caracterización dinámica de suelos para 23 sitios distribuidos en la Ciudad de San Juan de Pasto. El estudio consta de una descripción general del área de estudio, la geología y sismicidad de la ciudad, además de otros datos de interés; un marco teórico de conceptos generales del estudio del movimiento del suelo, con métodos de evaluación de los efectos sísmicos locales; una recopilación de la información geotécnica existente; cálculo de periodos de resonancia mediante métodos numéricos (Zeevert, NSR-98), y mediante el método de microtrepidaciones propuesto por Nakamura.

Posteriormente mediante la aplicación del método numérico ProShake, además de obtener periodos de resonancia para los los 23 sitios, se calculan los espectros elásticos de respuesta.

Finalmente con los resultados obtenidos se realiza un diagnóstico preliminar en lo referente al uso de la NSR-98, obteniendo espectros elásticos de diseño mediante la formulación de la Norma y espectros de diseño en función de las condiciones locales y diferentes niveles de intensidad sísmica, mostrando una gráfica comparativa de dichos espectros para cada uno de los sectores en análisis.

ABSTRACT

Keeping in mind the seismic threat to which is subjected the city of San Juan de Pasto, it is necessary to carry out studies of dynamic analysis as fundamental tool to know the answer and behavior of the soils in front of the seismic waves.

The present investigation shows the dynamic characterization of soils for 23 places distributed in the City of San Juan of Pasto. The study consists of a general description of the study area, the geology and seismic of the city, besides other data of interest; a theoretical mark of general concepts of the study of the movement of the floor, with methods of evaluation of the local seismic effects; a summary of the information existent Geotechnical; calculation of periods of resonance by means of numeric methods (Zeevert, NSR-98), and by means of the microtremors method proposed by Nakamura.

Later on by means of the application of the numeric method ProShake, besides obtaining periods of resonance for those the 23 places, the elastic spectra of answer are calculated.

Finally with the obtained results he/she is carried out an I diagnose preliminary regarding the use of the NSR-98, obtaining elastic spectra of design by means of the Norma's formulation and design spectra in function of the conditions local and different levels of seismic intensity, showing a comparative graph of this spectra for each one of the sectors in analysis.

CONTENIDO

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 0 | INTRODUCCIÓN..... | 20 |
| 1. | MARCO GENERAL..... | 22 |
| 1.1 | ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN..... | 22 |
| 1.2 | DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA..... | 24 |
| 1.3 | ALCANCES Y LIMITACIONES..... | 26 |
| 1.4 | OBJETIVOS..... | 27 |
| 2 | ÁREA DE ESTUDIO: SAN JUAN DE PASTO..... | 28 |
| 2.1 | LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA..... | 28 |
| 2.2 | GEOLOGÍA Y SISMICIDAD DE NARIÑO..... | 28 |
| 2.2.1 | Marco geológico regional..... | 28 |
| 2.2.2 | Geología local..... | 29 |
| 2.2.3 | Geología estructural..... | 30 |
| 2.2.4 | Sismicidad de Nariño..... | 31 |
| 3 | ESTUDIO DEL MOVIMIENTO DEL SUELO..... | 34 |
| 3.1 | CONCEPTO DE ONDA..... | 34 |
| 3.1.1 | Definición..... | 34 |
| 3.1.2 | Descripción de las ondas..... | 34 |
| 3.1.3 | Ondas elásticas..... | 34 |
| 3.1.4 | Contenido espectral de las ondas..... | 35 |
| 3.1.5 | Interferencia..... | 36 |
| 3.1.6 | Ecuación de la onda..... | 37 |
| 3.1.7 | Velocidades de las ondas elásticas..... | 38 |
| 3.2 | FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA..... | 39 |
| 3.3 | FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL MOVIMIENTO DEL SUELO..... | 41 |
| 3.3.1 | Influencia de la fuente..... | 41 |
| 3.3.2 | Influencia de la trayectoria..... | 42 |
| 3.3.3 | Influencia del suelo..... | 45 |
| 3.4 | MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE EFECTOS SÍSMICOS LOCALES..... | 46 |
| 3.4.1 | Métodos empíricos instrumentales..... | 47 |
| 3.4.2 | Método empíricos indirectos..... | 48 |
| 3.4.3 | Métodos numéricos..... | 48 |
| 4. | RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN..... | 50 |
| 4.1 | BASE DE DATOS GEOTÉCNICOS..... | 50 |
| 4.2 | ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DINÁMICOS A PARTIR DE PRUEBAS ESTÁTICAS..... | 53 |
| 4.2.1 | Obtención de las columnas de suelo representativas de las zonas de estudio Estimación de los parámetros dinámicos de los suelos en | |

| | |
|---|-----------|
| las zonas de estudio..... | 53 |
| 4.2.2 Estimación de los parámetros dinámicos de los suelos en las zonas de estudio..... | 55 |
| 4.3 PERIODO DE RESONANCIA DEL SUELO EN VIBRACIONES CAUSADAS POR FUERZAS CORTANTES..... | 61 |
| 4.3.1 Cálculo de los modos de vibración del suelo por métodos numéricos..... | 65 |
| 5 MICROTREPIDACIONES: APROXIMACIÓN AL ESTADO DEL ARTE..... | 68 |
| 5.1 INTRODUCCIÓN..... | 68 |
| 5.2 DEFINICIÓN..... | 68 |
| 5.3 NATURALEZA DE LAS MICROTREPIDACIONES..... | 69 |
| 5.4 METODOLOGÍAS PARA LA MEDICIÓN DEL EFECTO DE SITIO..... | 70 |
| 5.4.1 Antecedentes, metodología de Kanai y estudios posteriores..... | 71 |
| 5.4.2 Método 1: Observación con arreglos de sensores..... | 73 |
| 5.4.3 Método 2: Relación espectral con un sitio de referencia..... | 74 |
| 5.4.4 Método 3: Observaciones con un solo sensor (1 ó 3 componentes)..... | 74 |
| 5.5 METODOLOGÍA DE NAKAMURA..... | 75 |
| 5.5.1 Descripción..... | 75 |
| 5.5.2 Resultados de Nakamura..... | 77 |
| 5.5.3 Fundamentos de la técnica del cociente espectral H/V..... | 77 |
| 5.5.4 Aplicaciones y estudios técnicos y numéricos..... | 77 |
| 5.5.5 Otras aplicaciones..... | 84 |
| 5.5.6 Equipos y procedimiento de medición..... | 84 |
| 5.5.7 Procesamiento y análisis de las señales..... | 87 |
| 5.6 DISCUSIÓN Y SÍNTESIS..... | 88 |
| 6 MEDIDA DE MICROTREPIDACIONES..... | 91 |
| 6.1 EQUIPOS DE MEDICIÓN..... | 91 |
| 6.1.1 Sensor de velocidad Guralp CMG-40T..... | 92 |
| 6.1.2 Unidad de digitalización..... | 92 |
| 6.1.3 Acelerógrafo Etna..... | 93 |
| 6.2 PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN..... | 94 |
| 6.2.1 Tiempo de registro y tasa de muestreo..... | 94 |
| 6.2.2 Nomenclatura de archivos..... | 94 |
| 6.3 SITIOS DE MEDICIÓN Y REGISTROS..... | 97 |
| 6.3.1 Selección de sitios..... | 97 |
| 6.3.2 Descripción y registros..... | 97 |
| 6.4 PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES..... | 105 |
| 6.5 RESULTADOS PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES..... | 113 |
| 6.5.1 Periodos Fundamentales..... | 114 |
| 6.5.2 Factor de Amplificación..... | 114 |
| 6.6 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS..... | 119 |
| 6.6.1 Factor de Amplificación..... | 119 |
| 6.6.2 Periodos Fundamentales..... | 120 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 7. | APLICACIÓN MÉTODO NUMÉRICO (ProShake)..... | 124 |
| 7.1 | FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA..... | 124 |
| 7.2 | ESTRUCTURA DEL PROGRAMA..... | 126 |
| 7.3 | CARACTERIZACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL SUELO EN LAS ZONAS DE ESTUDIO..... | 132 |
| 7.4 | RESULTADOS OBTENIDOS DE LA APLICACIÓN DEL PROGRAMA PROSHAKE CON PULSOS DE RICKER..... | 132 |
| 7.5 | RESULTADOS OBTENIDOS DE LA APLICACIÓN DEL PROGRAMA PROSHAKE CON ACELEROGRAMAS DE SISMOS CON MAGNITUD LOCAL (ML) ENTRE 2.5 Y 6.8..... | 143 |
| 8 | DIAGNÓSTICO PRELIMINAR EN LO REFERENTE AL USO DE LA NSR-98..... | 155 |
| 8.1 | CÁLCULO DE ESPECTROS ELÁSTICOS DE DISEÑO DE ACUERDO A LA NSR-98 TÍTULO A, CAPITULO A2, PARA LOS PERFILES EN ESTUDIO..... | 155 |
| 8.2 | CÁLCULO DE ESPECTROS DE DISEÑO EN FUNCIÓN DE LAS CONDICIONES LOCALES Y NIVEL DE INTENSIDAD SÍSMICA..... | 163 |
| 9 | CONCLUSIONES..... | 184 |
| 10 | RECOMENDACIONES..... | 191 |
| 11 | BIBLIOGRAFÍA..... | 194 |
| | ANEXO 1..... | 206 |

ANEXOS

| | | |
|-----------------|--|-----|
| Anexo 1. | Entorno gráfico de consulta resultados obtenidos (HTML)..... | 206 |
| | Ejecutable en CD. | |

0. INTRODUCCIÓN

El desconocimiento del comportamiento dinámico de los suelos supera ampliamente la incertidumbre que hay en el caso estructural, por si misma muy significativa. El suelo se puede representar como un sistema de grados de libertad múltiples cuya respuesta ocurre en diferentes modos de oscilación, cada uno con su propia forma y frecuencia (Sarría, 2005).

Cuando el sismo que llega al sitio de la construcción es rico en frecuencias similares a las naturales del suelo, principalmente en el caso del modo fundamental y el modo fundamental de la edificación es similar al del suelo; ocurre un triple proceso de acoplamiento que genera las máximas fuerzas de inercia en la construcción. Con el estado actual del conocimiento se puede obtener el periodo de resonancia de la estructura T_0 , y el periodo de resonancia del suelo T_s , se busca que nunca sea $T_0 = T_s$ para que no se amplifiquen los efectos del sismo (Colindres, 2001).

Las variaciones de efectos sísmicos según características y propiedades de los diversos terrenos que, en general, conforman los territorios urbanos, han sido documentadas desde la antigüedad, porque las intensidades (el tipo y nivel de efectos y daños) han sido temas de interés históricamente. Pero es a partir de la segunda mitad del siglo XX cuando esta variabilidad empieza a ser investigada con fines de entenderla y proveer a la ingeniería medidas para optimizar los usos del suelo en cuanto a su respuesta sísmica (Rosales, 2001).

La diversidad de fuentes primarias de ondas sísmicas naturales y antrópicas sugiere que tanto los depósitos como las rocas están sujetos permanentemente a vibraciones. Dichas vibraciones pueden clasificarse en: (1) naturales: inducidas por cambios de presión atmosférica, tormentas, oleaje y, (2) artificiales: generadas por plantas de energía, voladuras en canteras, tráfico automotor, trenes, etc. Las primeras de periodos relativamente largos entre 2 y 3 segundos son conocidas como microsismos, mientras que las segundas que generan ondas de periodo corto han sido llamadas microtrepidaciones (Nakamura, 1989).

El análisis dinámico de los suelos es una herramienta fundamental, ya que a través de él podemos conocer la respuesta o comportamiento de los suelos frente a las ondas sísmicas; esta respuesta dinámica está íntimamente ligada con la frecuencia natural de vibración del suelo. Para llegar a conocer las frecuencias naturales de vibración de los suelos se han utilizado ampliamente las mediciones de vibración ambiental o microtrepidaciones, debido a que en corto plazo y con un solo instrumento sismológico se puede tener mucha información; esto indiscutiblemente genera bajos costos de operación y la obtención de registros en cualquier momento y lugar (Bermúdez, *et al* 2002).

La utilización de microtrepidaciones data de la década de los cincuenta. La metodología propuesta por Nakamura en 1989 para la estimación de la función de transferencia aproximada del suelo a partir de las componentes N-S, E-W y Z (Vertical) de los registros de microtrepidaciones en superficie proporciona resultados fiables, en la mayoría de los casos, para los periodos predominantes de amplificación del suelo (Alfaro, *et al* 1997b).

De acuerdo a los resultados que esta investigación ofrecerá es deseable que se impulse la utilización de microtrepidaciones para estudios de caracterización dinámica de suelos y de estructuras, ya que además estas son de permanente uso en la ingeniería sísmica y de gran aplicación en la ingeniería civil.

El desarrollo y resultados de la investigación se presentarán en esta memoria en 8 capítulos. En el primer capítulo se realiza un marco general anotando los antecedentes, justificación, descripción del problema, alcances y limitaciones además de los objetivos del presente trabajo.

En el capítulo 2, se describe el área general de estudio, se anota la geología y sismicidad de la ciudad de San Juan de Pasto, además de otros datos de interés general. En el capítulo 3, se realiza un marco teórico anotando el estudio del movimiento del suelo, en particular se describen conceptos generales como conceptos de onda, función de transferencia, factores que intervienen en el movimiento del suelo. Además se presenta los métodos de evaluación de los efectos sísmicos locales.

En el capítulo 4, se muestra una recopilación de la información geotécnica existente, para la caracterización dinámica de los suelos en los sectores de medición, y se calculan periodos de resonancia del suelo mediante un método numérico. En el capítulo 5, se describe la naturaleza de las microtrepidaciones: Aproximación al estado del arte. En el capítulo 6, se realiza la descripción de la medida de microtrepidaciones, anotando las características de los equipos de medición, además se describe el procesamiento de las señales, y el software usado para tal fin. En el capítulo 7 se describe la aplicación de un método numérico (ProShake) para la obtención de espectros elásticos de respuesta y caracterización del movimiento del suelo.

En el capítulo 8, se realiza un diagnóstico preliminar en lo referente al uso de la Norma de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98, obteniendo espectros elásticos de diseño mediante la formulación prescrita en la NSR-98 y espectros de diseño en función de las condiciones locales y diferentes niveles de intensidad sísmica, mostrando una gráfica comparativa de dichos espectros para cada uno de los sectores en análisis.

Finalmente se anotan las conclusiones y recomendaciones generales resultantes de éste trabajo de investigación además de la bibliografía consultada en el desarrollo del presente trabajo.

Debido a la gran cantidad de gráficas obtenidas a partir de los procesos aplicados estas se muestran en un entorno gráfico de consulta (anexo 1).

1. MARCO GENERAL

1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

La ciudad de San Juan de Pasto se encuentra localizada en un área que presenta una alta amenaza sísmica debido al ambiente tectónico regional, a los fenómenos inducidos por el movimiento del terreno como asentamientos y deslizamientos, a la actividad volcánica aledaña y a las condiciones geomorfológicas que generan modificación en la señal sísmica. Esta amenaza es diferente de una zona a otra y depende esencialmente de las características del suelo (Calpa, *et al* 2001).

El ambiente tectónico presenta actividad, en la cual el sistema de fallas frontal de la cordillera oriental, el sistema de falla Romeral y falla del Cauca, son las fuentes sismogénicas, hasta ahora reconocidas, de mayor efecto. A esto hay que sumarle el efecto de la zona de subducción y la zona de Benioff, cuya principal manifestación es el vulcanismo. Además se debe tener en cuenta dentro de la ciudad los movimientos inducidos o sismos antrópicos generados por diferentes actividades propias de la región (Calpa, *et al* 2001).

El comportamiento dinámico de los terrenos varía de acuerdo con sus propiedades elásticas, la geometría – espesor y forma de los depósitos sobre un basamento rocoso – y otros factores como la granulometría y el nivel freático (p. ej. Sauter, 1989; Sarria, 1996).

Algunos terrenos presentan un fenómeno conocido como “efecto de sitio” o efecto sísmico local, asociado con la amplificación selectiva de las ondas y la impedancia¹, lo que implica que se presenten mayores intensidades y por lo tanto mayores sollicitaciones sísmicas en las edificaciones emplazadas (Rosales, 2001).

Estudios realizados de zonificación geotécnica de Pasto, muestran una gran diversidad en las características de los suelos generando diferentes comportamientos ante el movimiento sísmico. Este efecto se incrementa por las condiciones Topográficas del terreno y genera una serie de fenómenos inducidos como asentamientos y deslizamientos, causando un riesgo inminente sobre la población (Calpa, *et al* 2001).

La necesidad de diseñar y construir edificios y otras estructuras de mayor singularidad o de especial importancia en zonas de alto riesgo sísmico, ha llevado a la Ingeniería Civil a adquirir un interés práctico por la naturaleza del movimiento del suelo producido por los terremotos, y por el comportamiento de las estructuras y sus materiales ante estas cargas dinámicas, siendo necesaria la determinación de las propiedades estáticas y dinámicas de los suelos (Cabañas, *et al* 1999).

El avance de la Ingeniería Civil y todas las labores encaminadas a la prevención de desastres apuntan a realizar análisis de riesgo exhaustivos, teniendo en cuenta el estudio de la amenaza sísmica y la vulnerabilidad de las estructuras y sistemas.

¹ Es una medida de la resistencia a la propagación de las ondas. Es el producto de la densidad y velocidad. (p. ej. Aki, 1998).

Dentro de la evaluación de la amenaza sísmica uno de los componentes más importantes es la caracterización dinámica de los suelos, en la cual se clasifican los tipos de suelo dependiendo de sus características como modificador de la señal sísmica.

Por otra parte, el estado actual del conocimiento y desarrollo tecnológico ponen a disposición diversas metodologías para la evaluación de propiedades mecánicas y dinámicas de los suelos, incluyendo acceso relativamente fácil a bajo costo, a tecnologías y herramientas para ensayos *in situ*; por ejemplo adquisición y procesamiento de señales de microtrepidaciones (Rosales, 2001).

Toda metodología tiene un grado de incertidumbre, sin embargo de las diferentes técnicas que utilizan microtrepidaciones para realizar la caracterización dinámica de los suelos, la de Nakamura (1989) ha tenido bastante aceptación debido a su fácil implementación tanto en el trabajo de campo como en el procesamiento de datos.

La técnica de Nakamura se ha utilizado en varias ciudades cuyos suelos tienen características geotécnicas diferentes. Se ha comprobado en algunas ciudades que los resultados obtenidos por el método de Nakamura concuerdan con ensayos de laboratorio, o análisis de terremotos y modelación numérica, sin embargo, no en todos los sitios ha sido así. Además, uno de los métodos para la determinación de la función de transferencia aproximada de las capas superficiales del suelo a partir de microtemblores registrados en superficie, fue propuesto por Nakamura definiéndola como la relación entre el espectro de Fourier de la componente horizontal del microtemblor y el espectro de la componente vertical (Alfaro, *et al* 1997a).

Debido a las grandes ventajas del método en términos de logística y procesamiento de información, éste se ha difundido y viene siendo utilizado en varias ciudades del mundo para obtener mayor información del subsuelo. La aplicación del método de Nakamura se ha llevado a cabo en varias ciudades del país como Bogotá, Pereira, Villavicencio, Armenia entre otras, obteniendo resultados claros en la evaluación del periodo predominante, como en el caso de la ciudad de Bucaramanga cuyos resultados presentados en el estudio realizado se compararon con los obtenidos en otras ciudades observando que la variación en los periodos es muy baja lo cual indica que los suelos presentan una tendencia a ser homogéneos; también se obtuvo una buena correlación entre los periodos obtenidos a partir de microtrepidaciones y los obtenidos a partir de registros sísmicos, estos resultados hacen clara la efectividad de la técnica de Nakamura con fines de caracterizar los suelos de una ciudad (Bermúdez, *et al* 2002).

Realizar la caracterización dinámica de los suelos en un entorno urbano es, hoy en día, esencial para aspectos de reglamentación urbana, y para los parámetros específicos de diseño y construcción sismorresistente. Incluso la legislación así lo estipula para ciudades colombianas (AIS, 1998). El objetivo de estas evaluaciones es el de estimar el comportamiento de los suelos ante un evento sísmico e incluso, después de otras etapas y de estudios posteriores, dividir la ciudad en microzonas con respuesta sísmica homogénea (microzonificación).

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los terremotos catastróficos ocurridos en los últimos años han puesto de manifiesto que el movimiento del suelo varía, en ocasiones drásticamente en función de la naturaleza, propiedades mecánicas o topografía del sitio y, consecuentemente, los daños ocasionados también: a igual distancia de la fuente en determinados puntos la aceleración, velocidad y/o desplazamiento máximo del suelo es mucho mayor en unos puntos que en otros. En ocasiones puntos próximos a la fuente han sufrido menos daños que otros alejados.

Según las leyes de atenuación, la intensidad del movimiento disminuye con la distancia del epicentro, sin embargo, a cualquier distancia del epicentro, las ondas sísmicas pueden amplificarse por el fenómeno “efecto de sitio”, que corresponde a la fase final de trayectoria de las ondas, cuando se aproximan a la superficie y entran en contacto con depósitos de suelos (p. ej. Sauter, 1989).

La fuerte influencia de las condiciones de sitio en los daños ocasionados por terremotos ha sido reconocida desde hace más de 200 años (Drake, 1985,82²; Ladoucette, 1848³). Pero es en las últimas décadas que el problema empezó a ser tenido en cuenta en los estudios de evaluación de la amenaza sísmica y en la planificación urbana.

Esto se debe a la creciente evidencia empírica e instrumental acumulada en diversos terremotos históricos importantes. Entre los más recientes están los efectos diferenciales y dramáticos, en términos de daños por efecto de sitio en países como Chile, Canadá, México y Japón; En Colombia también se ha documentado el “efecto de sitio” con base registros instrumentales, por ejemplo, el sismo del Eje Cafetero del 25 de enero de 1999 generó en suelo aceleraciones de 0.29g con registros en roca de 0.05g (según CARDER⁴, 1999). La norma sismorresistente colombiana (NSR-98) en el Artículo A.2.4 (Efectos locales) incluye explícitamente cuantificar el efecto local a través del coeficiente de sitio, el cual depende de la conformación del suelo, la profundidad y la velocidad de propagación de la onda S.

Este fenómeno, conocido como efecto del sitio, es difícil de incorporar en las leyes de atenuación dada su complejidad, pero es necesario tenerlo presente en la estimación del riesgo sísmico de una región. La existencia de distintas unidades geotécnicas en la ciudad de San Juan de Pasto hace posible prever que este fenómeno se presente, por lo cual es necesario realizar un análisis del efecto de sitio y una caracterización dinámica de los suelos con el fin de estimar cuantitativamente el comportamiento de las edificaciones frente al suelo en la ciudad.

Por ejemplo con base en centenares de registros y reportes de efecto de sitio Tiedemann (1992) concluye que los valores de intensidad para depósitos aluviales se pueden incrementar hasta tres grados en la escala de Mercalli Modificada. Seed *et al* (1976), retomado en la literatura reciente (p. ej. Dobry *et al*, 2000), presenta el “efecto de sitio”

² En Field *et al*, 2001.

³ En Cotton *et al*, 1999.

⁴ Corporación Autónoma Regional de Risaralda. (CARDER, Colombia - red de estudios sociales en prevención de desastres en América latina).

comparando los cocientes espectrales de aceleración registrados en diversos tipos de suelo y roca, como se observa en la Figura 1.1. Con base en este tipo de resultados los códigos sismorresistentes modernos incluyen diferentes clasificaciones de suelos y espectros de respuesta para fines de ingeniería.

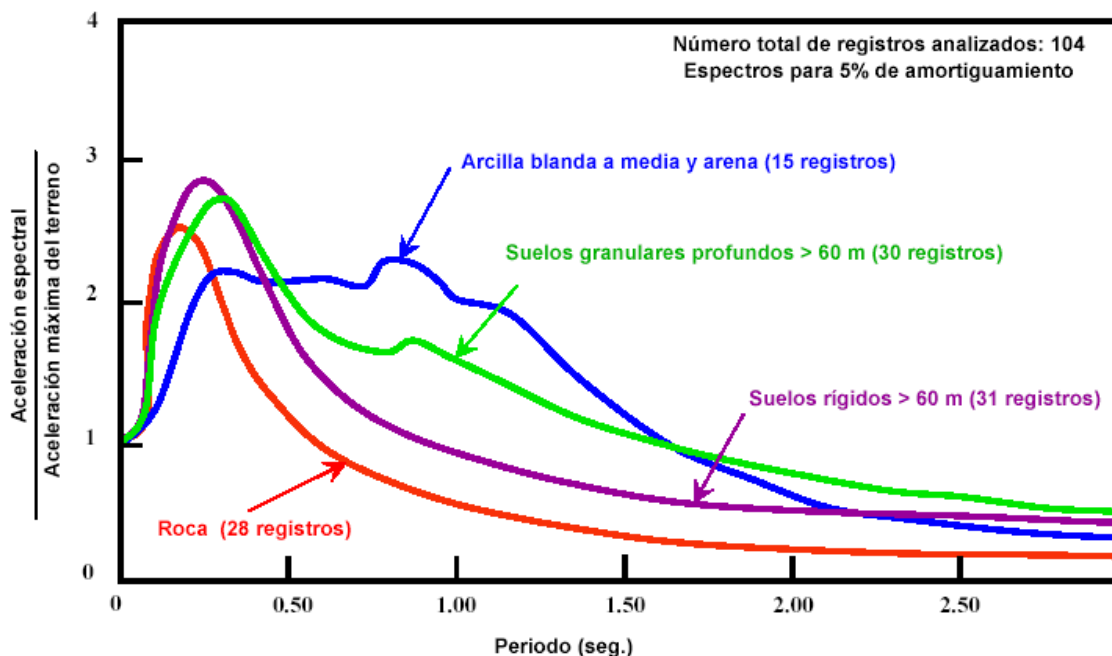


Figura 1.1. Espectro de aceleraciones promedio para diferentes condiciones.

El periodo natural de los suelos también puede ser una variable importante cuando coincide con el periodo de vibración de los edificios, como se ilustró para el sismo de 1967 en Caracas (Rodríguez-Marek, *et al* 2000), o cuando coincide con el periodo de vibración de las ondas S del sismo (p. ej. Sauter, 1989).

La amplificación de los movimientos del terreno en superficie está significativamente afectada por el periodo natural de vibración del sitio (Rodríguez-Marek *et al*, 2000). De hecho la máxima amplificación teórica en suelo (cociente entre aceleración pico en suelo y en roca) ocurre en la frecuencia de resonancia (no amortiguada) del suelo para las ondas S.

El uso potencial de esta caracterización en planes de ordenación urbana, de gestión, uso del suelo, y los altos costos que los métodos tradicionales implican, además de la incertidumbre existente en el uso de parámetros generales recomendados por la NSR-98 que inciden directamente en el diseño y construcción de obras ingenieriles dentro de la ciudad, motiva el desarrollo de la propuesta con fin de obtener parámetros indispensables con propósitos de ofrecer herramientas para el desarrollo de las líneas de investigación propuestas por el centro de investigación en Ingeniería Sismológica de la Universidad de Nariño.

Las preguntas planteadas en este proyecto para lograr una aproximación al entendimiento del fenómeno antes descrito en la ciudad de San Juan de Pasto en los sectores de estudio son:

- ✓ ¿Se conocen las ventajas y limitaciones de la aplicación del método propuesto por Nakamura en proyectos realizados en otras ciudades?
- ✓ ¿Se ha adaptado la caracterización dinámica de suelos en sectores de la ciudad de San Juan de Pasto al método de microtrepidaciones (Nakamura)?
- ✓ ¿Existen estudios preliminares del comportamiento del suelo ante movimientos sísmicos de origen tectónico?
- ✓ ¿Existe una zonificación geotécnica de los suelos presentes en San Juan de Pasto?
- ✓ ¿Cuáles son las componentes espectrales – frecuencias o periodos – transmitidos o amplificados por los suelos presentes en la ciudad de San Juan de Pasto?
- ✓ ¿Cuáles son los equipos más apropiados para registrar las vibraciones naturales del suelo, para desarrollar campañas de medición de microtrepidaciones en la ciudad de San Juan de Pasto?
- ✓ ¿Qué tan acertadas son las recomendaciones realizadas por la Norma de Diseño y Construcción Sismorresistente NSR-98 en su título A, sección A.2.4 con respecto a los efectos locales, en los sectores de estudio?

Una aproximación a las respuestas de estas preguntas sería un aporte en relación con la práctica normal de la geotecnia y la ingeniería estructural en la ciudad, ya que se determinarán parámetros dinámicos en un sitio, también se aportará a la solución del problema relacionando los efectos observados con sus causas sísmicas y geotécnicas, y que provea eventualmente parámetros para la planificación y el diseño en obras ingenieriles.

1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES

Los alcances de este proyecto están enfocados hacia abarcar y entender el problema, resolviendo las preguntas planteadas, hasta donde las limitaciones de disponibilidad de tiempo, datos, instrumentos y presupuesto lo permitan.

Las limitaciones son inherentes a cada metodología utilizada, (mediciones de microtrepidaciones), pero también a la cobertura urbana (pocos lugares son adecuados para realizar la medición de microtrepidaciones por la presencia de fuentes antrópicas como a árboles, quebradas, tráfico vehicular, lluvia entre otras), además de las condiciones técnicas y de mantenimiento del sensor utilizado en este trabajo de investigación.

1.4 OBJETIVOS

General.

Realizar la caracterización dinámica preliminar de suelos en sectores previa y geotécnicamente seleccionados de la ciudad de San Juan de Pasto por rangos de periodos y niveles de amplificación obteniendo el periodo predominante del mismo y su función de transferencia aproximada, mediante el método de microtrepidaciones propuesto por Nakamura.

Específicos.

- ✓ Realizar una campaña de medición del ruido sísmico en diferentes unidades geotécnicas previamente seleccionadas de la ciudad de San Juan de Pasto tanto en ladera como en el valle.
- ✓ Analizar los resultados de las adquisiciones obtenidas en campo y realizar el filtrado de las partes incoherentes (frecuencias no adecuadas) de las señales de entrada.
- ✓ Aplicar la teoría de Nakamura para obtener el periodo predominante, la función de transferencia aproximada y amplificaciones asociadas de las diferentes estratigrafías donde se realizará el muestreo.
- ✓ Evaluar las características relativas de periodo y amplificación de ondas, mediante registro y análisis de microtrepidaciones.
- ✓ Realizar recomendaciones para la selección del equipo más apropiado para desarrollar campañas de medición de microtrepidaciones en la ciudad de San Juan de Pasto de acuerdo a los resultados obtenidos y a las características técnicas de los equipos disponibles en el mercado actual.
- ✓ Realizar una comparación en lo referente al uso de las Normas de diseño y construcción Sismorresistente NSR-98, con los resultados obtenidos en los sectores de estudio seleccionados.

2. ÁREA DE ESTUDIO: SAN JUAN DE PASTO

2.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

La ciudad de San Juan de Pasto es la capital del departamento de Nariño y está situada al sur de Colombia, sobre el Valle de Atriz, como se observa en la Figura 2.1. Está localizada a los 01° 12' 49" de latitud norte y 77° 16' 52" de longitud oeste. Su altura sobre el nivel del mar es 2559 m y dista de Santa Fé de Bogotá 795 Km (IGAC, 1996).



Figura 2.1. Localización geográfica.

2.2 GEOLOGÍA Y SISMICIDAD DE NARIÑO

2.2.1 Marco geológico regional. El departamento de Nariño hace parte del occidente Colombiano, el cual se ha caracterizado por ser una región de gran diversidad y contraste litológico, puesto que se encuentra en una de las zonas de más intensa actividad geológica (vulcanismo, principalmente) y tectónica del país. (Muñoz, 1998).

En la actualidad se sigue presentando vulcanismo de tipo calcoalcalino andesítico, originando materiales tanto efusivos como piroclásticos, producto de los principales centros eruptivos, entre los que se encuentran: Complejo volcánico Galeras (CVG), Volcán Azufra, Volcán Cumbal, Volcán Chiles, Volcán Cerro Negro, Volcán Doña Juana,

entre otros, que junto a los productos fluviales, coluviales, fluvioacustres y volcanoclásticos del cuaternario moldean la topografía. (Murcia y Cepeda, 1991).

Tectónicamente, Nariño y todo el occidente Colombiano, continúan siendo afectados por el choque de las placas Nazca y Suramericana. Sus movimientos convergentes generan un esfuerzo compresivo regional. El proyecto GPS-CASA ha encontrado tasas de convergencia entre Nazca y Suramericana de 42 a 62 mm/a en el segmento Baitra-Jerusalén sobre la línea del Ecuador y de 31 a 54 mm/a en el segmento Isla Malpelo-Cali. (Kellog y Vega, 1995; en Romero, 1998).

2.2.2 Geología local. En la zona urbana y suburbana del municipio de San Juan de Pasto es posible reconocer las siguientes litologías: depósitos de caída piroclástica, depósitos de flujos piroclásticos, lavas, depósitos volcanoclásticos, depósitos aluviales, depósitos fluvioacustres y depósitos coluviales; productos en su mayoría de la actividad volcánica Terciaria y Cuaternaria de los diferentes centros eruptivos que rodean la zona, principalmente el complejo volcánico Galeras y volcán Morasurco. (Muñoz, 1998). En la figura 2.2 se puede observar la plancha geológica 429 de INGEOMINAS, donde se describe la geología del departamento de Nariño. (Murcia y Cepeda, 1991).

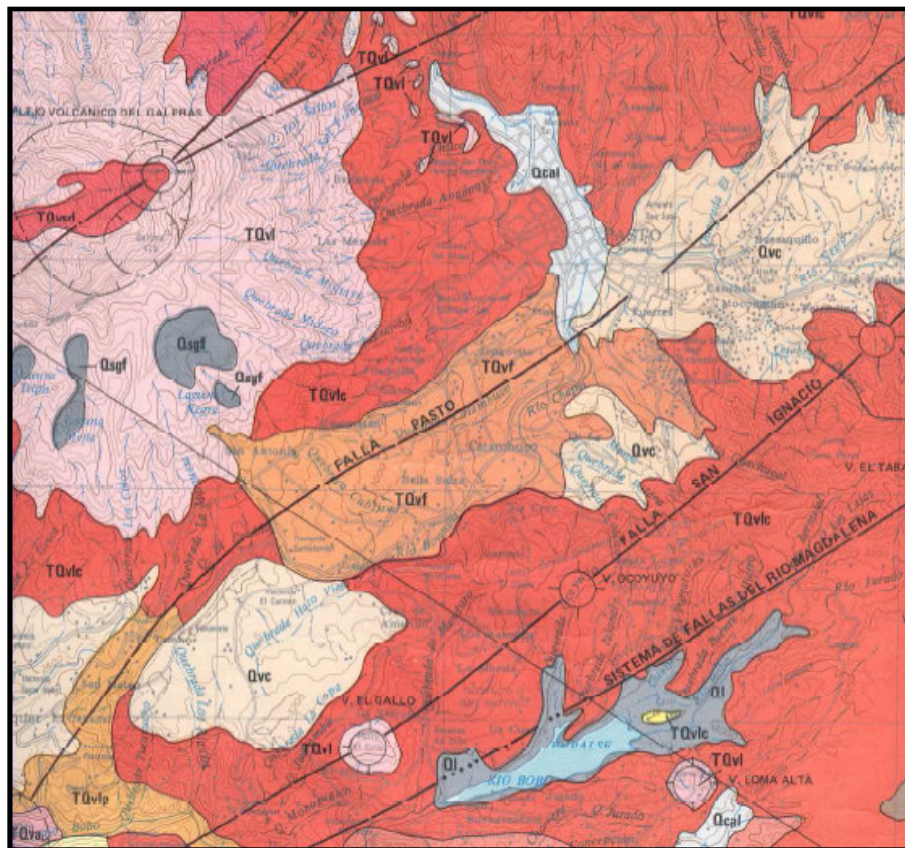


Figura 2.2. Plancha geológica 429 INGENOMINAS

2.2.3 Geología estructural. Nariño se encuentra en una de las zonas más activas geológica y tectónicamente del país, el área de estudio particularmente está rodeada por distintas estructuras tectónicas, que pese a su actividad se ven enmascaradas por potentes depósitos volcánicos Terciarios y Cuaternarios.

En los alrededores del complejo volcánico Galeras, Murcia y Cepeda, 1991, describen estructuras generales que tienen rumbos predominantes, reflejo de la convergencia de las tres Cordilleras Colombianas, junto al estrechamiento y levantamiento de las depresiones interandina Cauca-Patía.

Uno de los principales es el sistema de fallas de Romeral, el cual es la expresión morfológica de una paleozona de subducción Jura-Cretácica. Otras fallas importantes son: sistema de Fallas del Río Cauca (Falla Ancuya, Falla Yumbo), Falla Manchabajoy, Falla Buesaco, Sistema de Fallas la Magdalena, Falla San Ignacio, entre otras. En la figura 2.3, se puede observar los lineamientos de fallas en Colombia y las fallas influyentes en el departamento de Nariño.

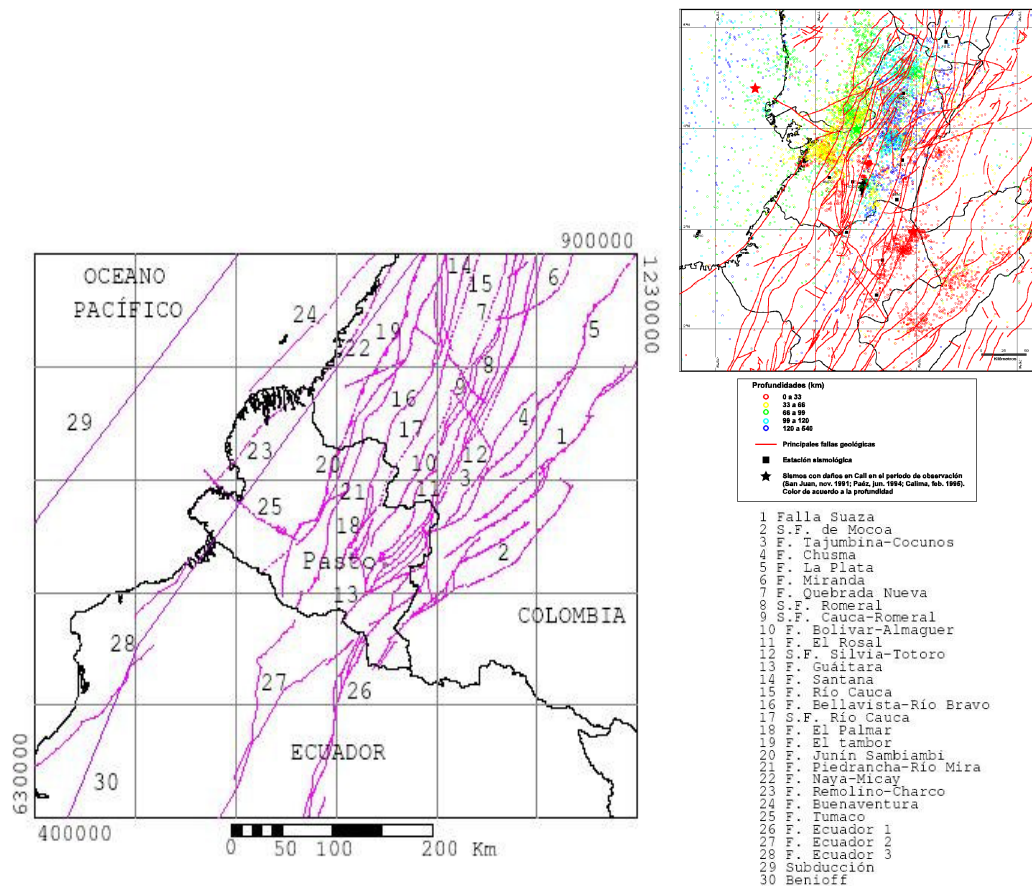


Figura 2.3. Lineamientos de falla influyentes en el departamento de Nariño.⁵

⁵ SILVA PARRA, Betty. Evaluación de la amenaza sísmica en el departamento de Nariño. San Juan de Pasto. Universidad de Nariño. Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas. 2005. 175 p.

2.2.4 Sismicidad de Nariño⁶. El departamento de Nariño está localizado dentro de una de las zonas sísmicamente más activas de la Tierra, la cual se denomina Anillo Circumpacífico. Desde el punto de vista geodinámico el emplazamiento tectónico de esta región es complejo, pues es el resultado de la convergencia de las placas de Nazca con la placa Suramericana.

El Departamento de Nariño está ubicado en una zona de rasgos tectónicos con actividad reciente, que se ve reflejado con la alta actividad sísmica caracterizada por terremotos desastrosos. A continuación se presenta una relación de los sismos más importantes que han afectado al departamento de Nariño.

Los primeros sismos que se tiene conocimiento de haber afectado el departamento son los ocurridos en el Ecuador en 1541, 1587, 1698, 1763 y 1797, dejando en ruinas a muchas ciudades del Ecuador, como en las provincias de Quijos, Ambato, Latacunga y Riobamba (Ramírez, 1975).

El 16 de noviembre de 1827 ocurrió un sismo de magnitud 7.7 Ms en cercanías a Gigante en el Huila, causando muchos daños (Ingeominas, 1998). Este evento es considerado el mayor sismo intracontinental conocido en Colombia y su período de retorno puede estimarse entre 400 y 800 años (Soulas, Yepez y Pérez, 1991).

El 20 de enero de 1834 a las 06:45 a.m. (11:45 hora UT) se presentó un sismo muy fuerte seguido de varias réplicas, que causó la destrucción de la ciudad de Pasto en Nariño, Almaguer en el Cauca y Sibundoy en el Putumayo; el epicentro de este sismo fue reportado en la cordillera oriental entre Caquetá y Putumayo (Ramírez, 1975). Existen versiones de que en esta misma fecha y hora ocurrió una erupción en el volcán Patascoy y no un sismo (Rodríguez, 1959). Una gráfica de la sismicidad registrada por la red sismológica Nacional de Colombia para Colombia y el departamento de Nariño, se muestra en la figura 2.4.

1906, enero 31, 10:36 a.m. (15:36 hora UT). En el mar adentro frente a la costas de Colombia y Ecuador se presentó un sismo considerado como uno de los más grandes registrados en el mundo durante el siglo pasado, con una magnitud de 8,6 Ms ($M_w = 8,8$); se dice que es uno de los 6 sismos a nivel mundial que más energía cinética han liberado. Lo más grave de este sismo fue la presencia de un tsunami o maremoto que llegó a Tumaco, causando la muerte de unas 1.000 personas por ahogamiento. Este maremoto también afectó a Guapi en Colombia y a Bahía de Caraquéz en el Ecuador. Después del evento principal se sintieron trepidaciones en Ecuador y el interior del País (Ramírez, 1975). Se dice que hubo un levantamiento del litoral estimado 1.62 metros (Sarria, 1995).

El 14 de julio de 1947, a las 02:01 a.m. (07:01 hora UT) ocurrió un terremoto en Pasto seguido por tres réplicas de importancia. De este sismo hay reportes de intensidades de IX y VIII de Rossi-Forel presentadas en el territorio limitado por los cañones Guaitara y Juanambú, intensidades de IV en el pacífico, y rápidamente disminuyó III y II en las llanuras del Putumayo. Se piensa que este sismo fue superficial (menor de 10 Km. De profundidad) y se sintió primero un movimiento vertical y luego un movimiento horizontal.

⁶ Ibid., p. 11.

Se presentaron ralladuras en las edificaciones. En la ciudad de Pasto se presentaron los siguientes daños: se desplomó la cúpula de la iglesia San Felipe con el temblor de las 10:00 a.m., parte de la fachada de la iglesia Santiago se cayó, se rompieron los vidrios de la iglesia Cristo Rey, se destruyeron 1 vivienda y 1 edificio, y se presentaron averías en el Hospital San Pedro y el Hospital Civil. Se presentaron daños en Pandiaco, Aranda, La Laguna, Pejendino (se cayó la iglesia y 23 casas), El Encano y Jamondino (se cayó el arco de la iglesia). En Genoy una cruz de piedra saltó de la base en donde se había asegurado con cemento y arcilla. Este sismo fue sentido en La Unión y causó averías en viviendas como caídas de techos. En Pasto el sismo se sintió de 4 a 7 segundos y en Umbría, Puerto Asís y Mocóa tuvo una duración de 1 segundo (Ramírez, 1975).

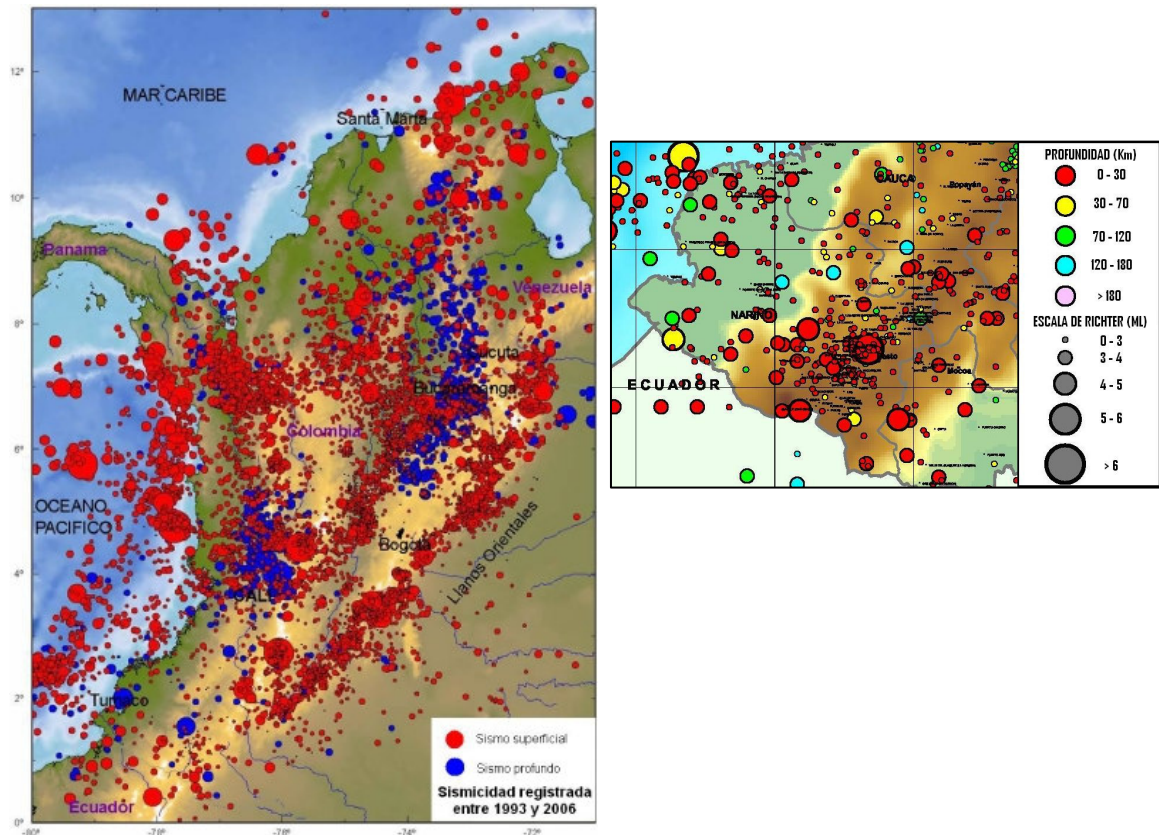


Figura 2.4. Sismicidad registrada por la Red Sismológica Nacional de Colombia 1993 – 2006

El 12 de diciembre de 1979, a las 03:00 a.m. (08:00 hora UT) en el Pacífico Sur Colombiano, ocurrió un sismo de magnitud 7,7 Ms ($M_w = 8,1$) que produjo aproximadamente 500 víctimas entre muertos y desaparecidos, tras la ocurrencia de un gran maremoto que ocasionó grandes destrozos en Tumaco y poblaciones menores de la Costa Pacífica en los departamentos de Nariño y Cauca (Sarria, 1995). Este sismo es considerado como el segundo más violento ocurrido en la costa colombiana del Pacífico después del sismo de 1906. La profundidad del sismo fue de carácter superficial, se estimó en 33 Km., y fue seguido de muchas réplicas durante todo el mes siguiente (Ramírez y Goberna, 1980).

En los departamentos de Nariño y Cauca se presentaron los mayores daños y pérdidas de vidas. En Nariño se estimaron 452 muertos, 1.011 heridos, 95 desaparecidos, 3.081 viviendas destruidas y 2.119 viviendas averiadas; y en el Cauca suman 454 muertos, 1.047 heridos, 125 desaparecidos, 18 edificios averiados, 3.540 casas destruidas y 2.503 casas averiadas. Adicional al maremoto se presentaron otros efectos secundarios como: deslizamientos en San Juan de la Costa, licuefacción, hundimiento de la costa sur del Pacífico (desde la Bocana de Guapi hasta el sur de Tumaco) de 25 cm a 1,50 m y agrietamientos hasta de 1 metro de ancho (Ramírez y Goberna, 1980).

En la misma noche del 12 de diciembre de 1979, nació en el mar Caribe una pequeña isla de 30 metros de longitud, 5 metros de ancha y 7 metros de altura, a unos 40 Km. de Cartagena. Esta isla desapareció totalmente en enero de 1980 erosionada por el fuerte oleaje del mar (Ramírez y Goberna, 1980).

Considerando las características de las réplicas ocurridas, la ruptura de la corteza se propagó hacia el NNE, manteniendo la misma profundidad, y por tanto la mayor energía se desarrolló contra la costa colombiana, lo mismo que el tsunami (Ramírez y Goberna, 1980).

Pasando a la actividad más reciente de los últimos 12 años, entre el 26 de abril y el 1 de mayo de 1993 se presentó una secuencia de sismos volcánico-tectónicos en la región norte-nororiente del volcán Galeras, que llegaron a tener una magnitud máxima de 4.5 Md y su profundidad fue muy superficial (menor a 10 Km.). Estos sismos produjeron temor en los habitantes de las poblaciones aledañas a la región epicentral. En este mismo año, entre el 24 de noviembre y el 4 de diciembre, nuevamente se presentó otra secuencia de sismos volcánico-tectónicos ubicado en la misma región del episodio anterior; las magnitudes fueron inferiores a 4.0 Md y de profundidades a nivel superficial. De los 107 eventos registrados 15 fueron sentidos en la ciudad de Pasto, pero solamente causaron pánico en la gente.

Entre el 4 de marzo y el 30 de octubre de 1995, se suscitó un enjambre de unos 3000 sismos volcánico - tectónicos, cuyo evento principal ocurrió el día 4 a las 06:23 p.m. (23:23 hora UT) alcanzando una magnitud de 4,7 Md. Este evento se localizó a 5 Km. al nororiente del cono activo del volcán Galeras a una profundidad de 11,2 Km. 80 sismos fueron reportados como sentidos en Pasto y poblaciones vecinas al volcán. Seis personas murieron en Pandiaco por desprendimiento de una roca del talud, unas veinte casas fueron seriamente dañadas en los sectores de Daza y Chachatoy Alto, se presentaron pequeños deslizamientos de los taludes de las vías (Gómez y Cortés, 1995). El origen de estos sismos posiblemente está relacionado con sistemas de fallas geológicas que se localizan en inmediaciones del complejo volcánico Galeras (Ingeominas, 1995).

Desde cuando el volcán Galeras mostró nuevamente signos de actividad en 1989, se han sentido también varios remezones asociados con la misma, especialmente en Pasto y poblaciones alrededor del volcán, tales como el 24 de abril, 23 de julio, algunos sismos del episodio sísmico de agosto, el del 30 de septiembre, 2, 5 y 8 de octubre, 23 de noviembre de 1989, 9 de marzo, 27 de mayo, 1, 2 y 6 de junio, 5, 6 y 19 de julio, 11 y 12 de septiembre, 5 y 24 de noviembre de 1990, 17 de julio de 1992 y otros tantos más especialmente en los años 1993 y 1995 (Silva, 2000).

3. ESTUDIO DEL MOVIMIENTO DEL SUELO

3.1 CONCEPTO DE ONDA⁷

3.1.1 Definición. El movimiento ondulatorio puede considerarse como un transporte de energía y cantidad de movimiento desde un punto del espacio a otro, sin transporte de materia.

Las ondas se clasifican en dos categorías: viajeras y estacionarias. En las primeras hay propagación de energía mientras que en las otras la energía asociada a la onda permanece confinada entre dos fronteras (p. ej. Gettys, 1991).

En la trayectoria de un frente de ondas se distinguen dos aspectos: 1) el movimiento de la onda a través del medio y, 2) el movimiento oscilatorio de las partículas del medio.

3.1.2 Descripción de las ondas. Los parámetros que se usan para describir una onda son: la frecuencia, $f = 1/T$, y la frecuencia angular, $\omega = 2\pi/T$, donde T es el periodo; y el número de onda, $k = 2\pi/\lambda$, donde λ es la longitud de la onda.

3.1.3 Ondas elásticas. Los sismos generan dos tipos de ondas elásticas que se propagan a través del medio: las ondas de cuerpo o de volumen, y las ondas superficiales. La velocidad de propagación depende de la densidad del medio y de sus propiedades elásticas, el módulo de incompresibilidad y el módulo de rigidez.

Las ondas elásticas generan fuerzas y deformaciones que obedecen la teoría de la elasticidad, en la cual los cuerpos sólidos tienen la propiedad de resistir cambios de tamaño o de forma, y de regresar a la condición no deformada cuando se eliminan las fuerzas externas.

Ondas de volumen.

Primarias o de compresión (ondas P): son las que se propagan a mayor velocidad, por lo que a cualquier distancia del foco son registradas primero, de allí su nombre. Al propagarse hacen vibrar las partículas en el mismo sentido del tren de ondas, produciendo compresión y dilatación a su paso. Son conocidas también como ondas longitudinales.

Secundarias o de cortante (ondas S): Hacen vibrar las partículas en sentido perpendicular al de su propagación. Tienen velocidades menores que las ondas P. Si las partículas oscilan de arriba a abajo, la onda se llama SV, si las partículas oscilan en un plano horizontal se llaman SH. También son conocidas como ondas transversales.

⁷ ROSALES CLIMENT, Cristina. Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia. Cali, 2001. p 24-28 y 35-38. Trabajo de grado (Ingeniera Civil). Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática.

Ondas superficiales.

Love (ondas L): se propagan de forma similar que las ondas S haciendo vibrar las partículas horizontalmente en sentido perpendicular al de propagación, pero sin movimiento vertical.

Rayleigh (ondas R): tienen un movimiento similar al de las ondas en la superficie del agua, haciendo vibrar las partículas sobre un plano que apunta en dirección de la trayectoria de las ondas, con movimientos elíptico y vertical simultáneamente. Las ondas L y R solo se propagan en discontinuidades de impedancia.

Una gráfica descriptiva del tipo de ondas se puede observar en la figura 3.1.

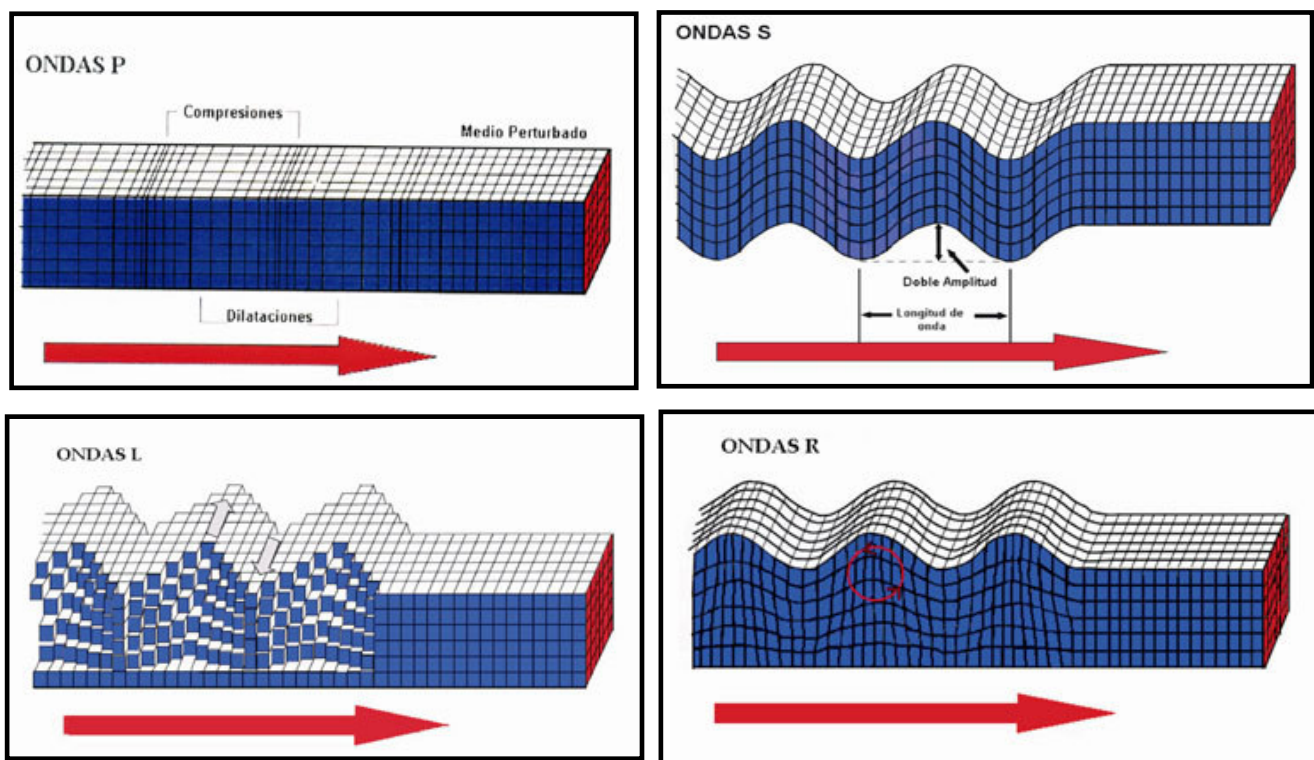


Figura 3.1. Tipos de ondas (Ondas de volumen - Ondas superficiales).

3.1.4 Contenido espectral de las ondas. Cada una de las ondas sísmicas presentadas tiene rangos de periodos de vibración característicos, los cuales pueden observarse en la Tabla 3.1.

En los métodos de refracción y reflexión de la geofísica aplicada, que miden principalmente la llegada de las ondas P, de frentes de ondas que se han refractado o reflejado en las diversas capas de suelo, las frecuencias asociadas con la reflexión se mantienen en una banda entre los 20 y 100 Hz, mientras que en la refracción se encuentran entre 1 y 20 Hz (e. g. Cantos, 1973).

| TIPO DE ONDA | PERIODO (Seg) |
|---|---------------|
| Ondas internas | 0.01 – 50 |
| Ondas superficiales | 10 – 350 |
| Oscilaciones libres | 350 – 3600 |
| <i>Fuente: Lay & Wallace (1995)</i> | |

Tabla 3.1. Periodos característicos de vibración de ondas sísmicas.

Por su parte, la ingeniería y la dinámica de suelos están interesadas en los periodos característicos de vibración de los suelos y los edificios. La respuesta de los edificios depende de la frecuencia predominante del movimiento sísmico – las frecuencias predominantes de las ondas S y P – y de las frecuencias naturales de la columna de suelo y del edificio. La respuesta del edificio se verá afectada si las dos frecuencias coinciden (p. ej. Sauter, 1989).

3.1.5 Interferencia. Cuando dos o más ondas coexisten en una misma región del espacio, se dice que se interfieren solo cuando las longitudes de onda son iguales. Esto es, que las ondas originales individuales se superponen para producir una onda resultante.

Hay dos casos especiales en la interferencia de ondas: interferencia constructiva (e interferencia destructiva), y ondas estacionarias.

Cuando dos ondas armónicas con igual amplitud, período y fase se interfieren, la onda resultante tiene una amplitud igual al doble de las ondas originales, esto se conoce como interferencia constructiva. Cuando las ondas no tienen igual fase crestas de una onda se superponen con los valles de la otra, esto se conoce como interferencia destructiva. Si el desfase es de 180° ó π , la amplitud resultante es igual a cero.

Si un tren de ondas se encuentra con una frontera (interfaz), la parte reflejada interfiere con la parte incidente del tren de ondas. Esta interferencia puede dar lugar a un patrón estacionario denominado onda estacionaria. Este tipo de ondas, de interés en muchos aspectos de la ciencia y la ingeniería, lo es también en algunos campos de la sismología.

La función de onda correspondiente a una onda estacionaria es:

$$y(x,y) = 2A\cos(\omega t)\sin(kx)$$

donde A es la amplitud del desplazamiento máximo de una partícula desde su posición de equilibrio, ω es la frecuencia angular y k es el número de onda, equivalente a $2\pi/\lambda$, donde λ es la longitud de la onda.

Una onda estacionaria no puede tener cualquier longitud. Solo puede tener alguna de las longitudes de onda específicas λ_n , que satisfagan las condiciones de contorno (tiempo de inicio y fin; distancia de inicio y fin). Como la frecuencia de una onda está relacionada con su longitud de onda según la expresión $f = v/\lambda$, la frecuencia de una onda estacionaria está restringida a una serie de valores específicos o frecuencias naturales de vibración f_n . La frecuencia natural mas baja se denomina frecuencia fundamental y las demás frecuencias naturales deben ser múltiplos enteros de la frecuencia natural de vibración (p. ej. Gettys, 1991).

3.1.6 Ecuación de la onda.

Ecuación cinética fundamental. Para describir la ecuación de movimiento fundamental de una onda, se puede considerar que una cuerda es desplazada hacia arriba y hacia abajo en uno de sus extremos, produciendo un tren de ondas sinusoidal que se propaga por la cuerda. A este tipo de ondas se le conoce como armónicas. La forma de la cuerda en un instante de tiempo es la de una función sinusoidal, como se muestra en la figura 3.2.

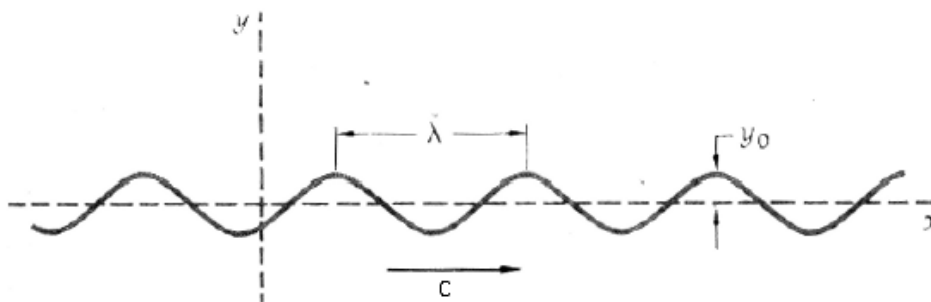


Figura 3.2. Formas de onda

La distancia entre dos máximos consecutivos de amplitud (o dos mínimos) se conoce como longitud de onda, λ . Cuando la cuerda se mueve hacia arriba y hacia abajo cada punto vibra a una frecuencia determinada, f .

Si se agita la cuerda por un tiempo, t , y a una frecuencia, f determinadas, el numero de ondas, N , generadas será $N = t * f$. La distancia recorrida, D , por la primera onda será $D = t * C$. El cociente entre N y D corresponde a la longitud de la onda:

$$\lambda = \frac{D}{N} = \frac{Ct}{ft} = \frac{C}{f}$$

De donde se obtiene la ecuación cinética fundamental de la teoría de ondas:

$$C = \lambda f$$

Ecuación de la onda en función de la distancia y el tiempo. Para describir la ecuación de la onda de un sólido elástico es necesario recurrir a la Ley de Newton.

$$F = m * a = \rho * \frac{d^2 u}{dt^2}$$

Como la fuerza depende de la tasa de cambio espacial del esfuerzo, es obvio que si el esfuerzo es uniforme no hay fuerza. Por esta razón se puede recurrir entonces a la Ley de Hooke, que relaciona el esfuerzo en términos de la deformación.

Para una barra simple, donde el desplazamiento es $u(x,t)$:

$$\rho * \frac{d^2 u}{dt^2} = m * a = \frac{d}{dx} (E * \frac{du}{dx}) = E (\frac{d^2 u}{dx^2}).$$

Como la velocidad de la onda longitudinal en una barra es:

$$C_p = \left(\frac{E}{\rho} \right)^{1/2}$$

por lo tanto:

$$\frac{d^2 u}{dt} = C_p^2 * \frac{d^2 u}{dx}$$

que es lo mismo que:

$$\frac{d^2 u}{dx} = \frac{1}{C_p^2} * \frac{d^2 u}{dt}$$

Esta es la ecuación general de una onda. La ecuación se puede satisfacer para cualquier onda en una sola dimensión que se propaga sin dispersión o sin variación de forma (e. g. Gettys, 1991).

3.1.7 Velocidades de las ondas elásticas. En un medio homogéneo la velocidad de las ondas elásticas depende de la densidad de masa del suelo ρ , y de los parámetros elásticos: módulo de elasticidad, cociente de Poisson y módulo de rigidez. La velocidad de las ondas P y S vienen dadas por las siguientes ecuaciones (p.ej. Sarria, 1996):

$$C_p = \left[\frac{E(1-\sigma)}{\rho} (1+\sigma)(1-2\sigma) \right]^{1/2}$$
$$C_s = \left[\frac{\mu}{\rho} \right]^{1/2}$$

En la Tabla 3.2 se presentan los valores típicos de la velocidad de propagación de las ondas P.

| MEDIO | C _p , m/s |
|--|----------------------|
| Material superficial meteorizado | 305 – 601 |
| Gravas, guijo, arenas (seca) | 468 – 915 |
| Arena (húmeda) | 610 – 1830 |
| Arcilla | 915 – 2750 |
| Agua (dependiendo de la T° y contenido de sales) | 1430 – 1680 |
| Agua de mar | 1460 – 1530 |
| Arenisca | 1830 – 3970 |
| Shale (roca arcillosa que se parte el laminas) | 2750 – 4270 |
| Tiza (Chalk-arcillas) | 1830 – 2970 |
| Caliza (Limestone) | 2140 – 6100 |
| Sal | 4270 – 5190 |
| Granito | 4580 – 5800 |
| Rocas metamórficas | 3050 – 7020 |

Tabla 3.2. Velocidades típicas de ondas P

3.2 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA⁸

En las últimas décadas se ha establecido como útil un formalismo originado en la teoría matemática de los sistemas, el concepto de “función de transferencia”, que define el comportamiento de un sistema transmisor, considerado como “caja negra”, mediante un modelo o fórmula matemática. En este concepto la función de salida de un sistema se define como la operación de la “función de transferencia” sobre una función de entrada, como se ilustra en el ejemplo de la Figura 3.3.

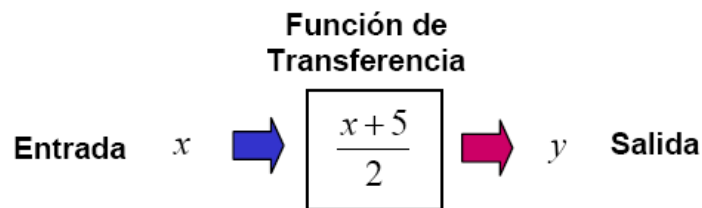


Figura 3.3. Función de transferencia.

En sismología el movimiento de las vibraciones en un sitio de observación, $u(t)$ puede ser expresado como la función de generación de las ondas $s(t)$ afectada por la función de transferencia debida la propagación de las ondas a través de las estructuras geológicas $g(t)$, como se muestra en la Figura 3.4.

⁸ Ibid., p. 15



Figura 3.4. Función de transferencia por la geología.

En la práctica, la observación de las vibraciones se hace a través de instrumentos especializados, los cuales actúan también como “cajas negras”, entre las vibraciones en el sitio de medición y los datos registrados de estas vibraciones.

Un instrumento se puede caracterizar formalmente mediante su función de transferencia, es decir, por su modelo matemático entrada/salida, en el que la entrada sería el movimiento real del terreno, $u(t)$ y la salida la lectura en el instrumento. Las funciones de transferencia de instrumentos usados en sismología y geofísica suelen estar disponibles desde el fabricante.

Así, la señal de salida del instrumento, $o(t)$, puede ser expresada como resultado de la función de generación $s(t)$ en combinación (matemáticamente una convolución) con la función de transferencia de la geología, $g(t)$ y la función de transferencia del instrumento $i(t)$ así: $o(t) = s(t)*g(t)*i(t)$, como se ilustra en la Figura 3.5.

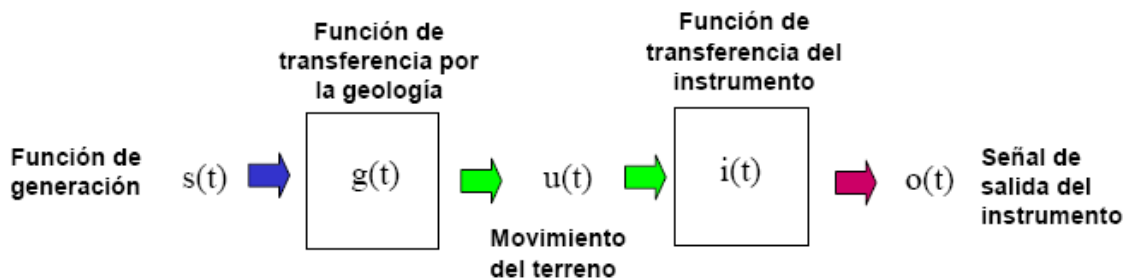


Figura 3.5. Funciones de transferencia de la medición.

El reto y problema de la sismología es encontrar las funciones de generación y de transferencia de los medios geológicos, mientras que la función de transferencia del instrumento es un problema que ha sido resuelto desde las disciplinas de la física y la electrónica.

Asumiendo que en todos los casos la función de transferencia del instrumento de observación es conocida, el problema de la sismología “se reduce” a la investigación de dos variables: función de generación y función de transferencia, lo que se hace a través de la medición de la tercera variable, el movimiento del terreno.

Una de las principales tareas de la sismología y la geofísica es describir las funciones de transferencia que afectan las ondas a su paso por las diferentes capas de suelo y roca, a

partir de la medición de la “señal de salida”. Esto es conocido como el problema inverso o “deconvolución”. En la ingeniería civil, específicamente en la dinámica de suelos, el interés está centrado en conocer la función de transferencia del suelo, el cual actúa como una “caja negra” entre las ondas que arriban a la interface entre suelo y roca – basamento – y las ondas que llegan a superficie donde se asientan las obras civiles.

En la dinámica de suelos la función de generación corresponde al movimiento de las ondas en el basamento. Conocer esta función “de generación” es una tarea un poco más sencilla que en sismología, así que el problema puede resolverse más fácilmente teniendo dos puntos de observación, uno en superficie sobre suelo y uno en basamento. A veces se usa como punto de referencia, un punto de observación en roca, cercano al punto de medición en suelo, el cual puede reemplazar el registro en basamento.

3.3 FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL MOVIMIENTO DEL SUELO ⁹

El movimiento del suelo registrado en un punto es el resultado de la combinación de tres factores: proceso de ruptura en la fuente, propagación de las ondas a través del medio y efecto del suelo en el emplazamiento, como puede observarse en la figura 3.6.

3.3.1 Influencia de la fuente. Para explicar el efecto de la fuente en el movimiento observado en superficie, hay que recurrir a los distintos modelos de simulación del proceso de ruptura propuestos en la literatura. Dichos modelos facilitan la comprensión del mecanismo de generación de ondas sísmicas en el foco y requieren la estimación de determinados parámetros representativos de lo que se entiende como término fuente.

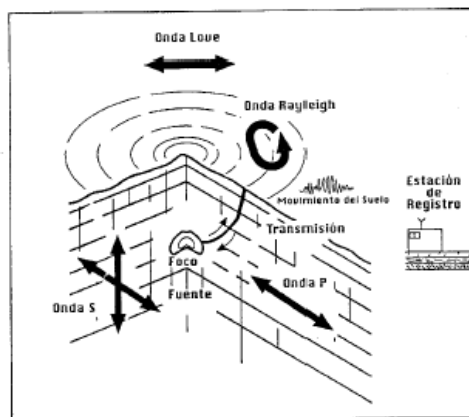


Figura 3.6. Diagrama de los factores que influyen en el movimiento vibratorio del terreno registrado en un punto (fuente-medio-estación). (Hays, 1989).

Los terremotos son producidos por el movimiento relativo de dos partes de una fractura de la corteza terrestre, causado por una acumulación de esfuerzos en la misma. Los fenómenos sísmicos se presentan entonces asociados a las fallas geológicas, idea que es comúnmente aceptada en la actualidad, no sólo porque permite explicar

⁹ CORAL MONCAYO, Hugo. Utilización de métodos experimentales y de simulación numérica para la microzonificación sísmica de áreas urbanizadas en Andorra. Barcelona, 2002. p. 18-23. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. E. T. S. Ingenieros de Caminos, C. y P. Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica.

satisfactoriamente el origen de la radiación generada por un terremoto, sino por la evidencia de correlación entre epicentros y fallas observadas en muchas regiones de la superficie terrestre. Partiendo de esta idea, se han propuesto en las últimas décadas diversos modelos físico-matemáticos con el fin de explicar el origen de la radiación. El primero de ellos fue desarrollado por Reid (1910) y su interpretación del fenómeno sísmico se conoce como teoría del rebote elástico. Según ella un terremoto tectónico tiene lugar al acumularse esfuerzos de cizalla en un punto de la corteza terrestre, iniciándose la fractura cuando la tensión sobrepasa el límite de resistencia del material. Esta se propaga sobre toda la superficie de la fractura con velocidad menor a la de las ondas de cizalla del medio. Los que se relacionan finalmente con el movimiento relativo de las placas tectónicas.

Posteriormente se han ido desarrollando otros modelos para explicar el origen de la radiación, cuya aplicabilidad depende de que las observaciones se realicen en campo próximo o lejano y de la configuración fuente-medio-estación para cada caso particular.

3.3.2 Influencia de la trayectoria. En la interpretación de registros del movimiento del suelo y predicción del mismo, hay que considerar la propagación de las ondas a través del medio situado entre la fuente y el punto de observación.

Desde su origen en el foco hasta su recepción en el emplazamiento, la radiación sufre una atenuación con la distancia que depende, fundamentalmente, de las características geométricas del frente de ondas y de las propiedades físicas del terreno a través del cual se propaga.

Estos factores tienen influencia no sólo en las amplitudes pico del movimiento, sino también en su composición espectral y en la duración del movimiento.

Dependiendo de que la observación se realice en campo cercano o lejano, las ondas recorrerán distintas trayectorias y los fenómenos que intervienen en la propagación serán también diferentes.

Por una parte, este efecto influye decisivamente en el orden de frecuencias dominantes de la agitación. A cortas distancias, las ondas se propagan a través de la corteza, que es menos disipativa que el manto superior para las altas frecuencias, mayores de 1 Hz.

Esto se refleja en los elevados valores de frecuencias de corte, ***f_{max}***, que aparece en los correspondientes espectros, del orden de 6 Hz. En contraposición, en campo lejano el espectro aparece desplazado hacia las bajas frecuencias, debido a que para este tipo de observaciones las ondas se propagan fundamentalmente a través del manto, que actúa como filtro de las altas frecuencias. La frecuencia de corte, ***f_{max}***, se sitúa entonces cerca de 1 Hz para las ondas P y de 0.25 Hz para las ondas S. Es, por tanto, bastante clara la influencia de la trayectoria en lo referente al contenido frecuencial del movimiento.

Por otra parte, la energía es disipada en su recorrido, produciéndose una atenuación de la amplitud con la distancia, debido básicamente a tres factores:

- Expansión geométrica del frente de ondas.
- Absorción anelástica del medio que separa la fuente del lugar de registro.
- Dispersión y difusión de las ondas por pequeñas heterogeneidades del terreno.

En un medio homogéneo se pueden considerar los efectos de expansión geométrica y de atenuación anelástica. La expansión geométrica depende fundamentalmente de la profundidad del foco y de la distancia epicentral, que determinan las características del frente de ondas.

Si el medio se considera homogéneo e isotrópico y elástico, la energía debe conservarse en los diferentes frentes de ondas. Estos avanzan aumentando su superficie, por lo que la amplitud correspondiente a cada punto disminuye a medida que nos alejamos del foco. Dicha amplitud puede calcularse en función de la energía radiada en la fuente y de la distancia de ésta al punto en cuestión.

Para cortas distancias el frente suele considerarse cilíndrico, con el eje de simetría en la dirección del deslizamiento en la falla. Para distancias mayores, la fuente se considera puntual y el frente de ondas esférico. Para una fuente puntual en un medio uniforme la expansión geométrica del frente de ondas produce una disminución de la amplitud del movimiento con la distancia r a la fuente, de la forma $1/r$. Para las ondas superficiales el frente de ondas es cilíndrico y el decrecimiento es de la forma $1/r^2$.

La atenuación anelástica es debida a las imperfecciones de la elasticidad del medio en el que se propagan las ondas así como a las heterogeneidades contenidas. Producen una disminución adicional de las amplitudes del tipo $e^{-\gamma r}$ donde r es la distancia a la fuente y γ el coeficiente de anelasticidad que está relacionado con el factor de calidad Q de la siguiente manera: $\gamma = \pi f / Q\beta$, donde f es la frecuencia de las ondas, β la velocidad de propagación de las ondas de cizalla y Q es muy grande en un medio elástico formado por terrenos consolidados en la Península Ibérica, se obtienen valores entre 200 y 500 para la corteza terrestre, (Pujades, 1999) en las capas superficiales, con poca cohesión, presenta valores inferiores a 50, o valores próximos a 10 cuando hay presencia de agua en los poros.

El factor Q del medio se desglosa en dos términos: Q_i , relacionado con la absorción intrínseca del material y Q_s , asociado a la atenuación por scattering (esparcimiento, dispersión). La capacidad del medio para producir este doble fenómeno de dispersión y difusión depende de la relación de la longitud de onda, λ , con una dimensión característica de las heterogeneidades del medio, L y con la separación entre éstas denominada distancia de correlación, δ . En la figura 3.7. se da una visión esquemática del comportamiento del medio según sea la relación entre λ y δ . Si la primera es muy distinta que la segunda, $\lambda \ll \delta$ o $\lambda \gg \delta$, las ondas no se ven afectadas por los obstáculos y el medio actúa como homogéneo.

En cambio, para valores similares de ambas variables el fenómeno de scattering puede llegar a ser muy fuerte.

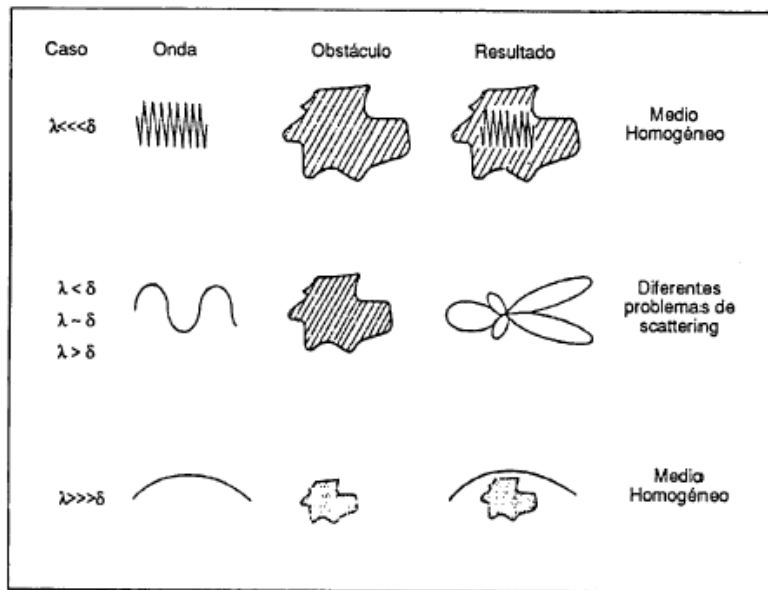


Figura 3.7. Esquema del comportamiento del medio en la propagación de las ondas sísmicas, atendiendo a la relación entre la longitud de ondas λ , y la distancia de correlación entre heterogeneidades δ . (Herraiz y Espinosa, 1986. En: Coral, 2002).

Con todo ello, la estimación directa de la atenuación anelástica que experimentan las ondas requiere, en principio, conocer de forma detallada la estructura atravesada por las mismas. En un planteamiento determinista del problema, si el medio no puede considerarse homogéneo e isótropo, sería necesario conocer un gran número de parámetros para evaluar su capacidad de absorción y dispersión; parámetros tales como contraste de velocidades y espesores, tamaño de las heterogeneidades, estructuras de fallas, entre otras, que influyen en la amplitud de las ondas dependiendo de su frecuencia.

Debido a la dificultad que este planteamiento conlleva, habitualmente se ha acudido en sismología a procesamientos estocásticos, que han permitido la evaluación del factor de calidad del medio, Q , cuyo valor inverso proporciona una medida de la atenuación buscada.

Numerosos autores han estimado estos coeficientes para una determinada región, mediante estudios basados fundamentalmente en un análisis de ondas de coda.

Estos han sido realizados a partir de terremotos locales (Aki, 1970), terremotos regionales o bien a partir de telesismos (González, 2002), proporcionando según la distancia epicentral y el tipo de onda analizada, información sobre distintas regiones de la corteza o el manto de la tierra.

El problema de la propagación de ondas sísmicas en un medio elástico estratificado sobre un semiespacio infinito ha estado extensamente estudiado. La aproximación más común es la de considerar los parámetros elásticos de las diferentes capas con valores uniformes y a partir de métodos basados en matrices de transferencia que relacionan los esfuerzos y los desplazamientos arriba y abajo de estas capas. Tenemos por ejemplo la aproximación introducida por Thompson (1950) y corregida más adelante por Haskell (1953). La aproximación de Kennett (Kennett y Kerry, 1979) es conocida con el nombre de método

de reflectividad y consiste en la representación del medio estratificado en términos de las propiedades de reflexión y transmisión de cada capa, los cuales se han realizado desde la base de la estratificación hasta la superficie de la misma.

En un medio no homogéneo, la correcta consideración de la atenuación requiere de un conocimiento detallado de su conformación. La heterogeneidad del medio atravesado produce cambios de la velocidad de propagación y pérdida de energía debido a las reflexiones y refracciones sucesivas (Figueras, 1994).

La influencia de la trayectoria podría determinarse con precisión si se conociera la estructura del medio atravesado por las ondas. Frecuentemente se han tomado modelos de capas planas cuyo efecto es bien conocido, pero en la mayoría de los casos las variaciones laterales en la corteza y en el manto superior, impiden realizar tal simplificación. Si además se producen fenómenos de difracción, dispersión y resonancia debido a la anelasticidad e inhomogeneidad del medio, la predicción del movimiento depende del posible uso de los métodos numéricos para resolver ecuaciones formuladas empíricamente.

Estas ecuaciones, que constituyen las llamadas leyes de atenuación, relacionan el parámetro característico del movimiento en un punto con el representativo de la energía liberada en el foco, junto con la distancia epicentral como término indicativo de la influencia de la trayectoria (Benito, 1993).

Por último conviene señalar que el efecto de la trayectoria no influye solamente en la amplitud y composición espectral del movimiento, sino también en la duración del mismo. La multitud de caminos que recorren las ondas a través de una litosfera heterogénea puede contribuir a un aumento de la duración del movimiento registrado en un punto, respecto al generado en la fuente. Este hecho puede tener una importante repercusión en los efectos del terreno, ya que como se indicó anteriormente, la duración es un factor determinante en el daño causado a las estructuras.

Concluyendo, la comprensión de los procesos de generación y propagación de ondas sísmicas en cada región es recomendable a la hora de predecir las características del movimiento esperado en la misma.

3.3.3 Influencia del suelo. El tercer factor que influye en el movimiento registrado en un punto es el tipo de suelo bajo la estación de registro, factor que, junto con la topografía, pueden causar efectos de atenuación o amplificación de las ondas incidentes sobre la base rocosa. Como ejemplo reciente se pueden citar los fenómenos de amplificación local observados en la zona lacustre de ciudad de México durante el terremoto ocurrido en el año 1985 en la costa del pacífico (Campillo et al., 1988; Chavez-Garcia, 1991). En lo referente a efecto topográfico local, se citan por ejemplo los estudios de Bouchon (1973), Bard y Tucker (1985), Bard (1985), Geli et al. (1988), entre otros.

Al considerar la geología local, se distinguen dos fenómenos que normalmente dan lugar a una amplificación del movimiento y, por tanto, son agentes importantes en los daños de las obras civiles. El efecto más conocido está asociado entre la interacción de la onda sísmica y la estructura del subsuelo. Se trata de la amplificación por resonancia que aparece en medios estratificados con rigidez creciente con la profundidad y resulta de la

superposición de múltiples reflexiones dentro de los estratos de baja velocidad próximos a la superficie. Su efecto depende fundamentalmente de la frecuencia.

El segundo tipo de amplificación no requiere de las discontinuidades bruscas donde tienen lugar fenómenos de reflexión; se trata de un efecto debido a la baja impedancia de los materiales próximos a la superficie. Este efecto de amplificación se compensa en parte por la atenuación, donde los materiales con baja velocidad (y baja impedancia) tienden a tener también valores pequeños de Q (Joyner y Boore, 1988).

Teniendo en cuenta que el rango de frecuencia de interés en la ingeniería sísmica se encuentra entre 0.1 Hz y 20 Hz y que las velocidades sísmicas en los suelos y rocas superficiales varían desde 100 m/s hasta algunos km/s, las longitudes de onda sísmicas correspondientes se encuentran en una decena de metros y algunos kilómetros. Serán las estructuras geológicas que estén en esta gama de dimensiones las que influirán significativamente en los efectos locales, estructuras de unos pocos kilómetros, como máximo (Bard, 1985).

La característica completa del denominado efecto del emplazamiento requiere considerar tres aspectos fundamentales:

- a) Composición y espesor de los estratos situados sobre la base rocosa, bajo el lugar de estudio, que configuran las condiciones locales del suelo.
- b) Variaciones laterales de la estructura geológica donde se asienta el emplazamiento, lo que constituye su topografía.
- c) Características de la radiación incidente, que depende del modelo de fuente y de su situación relativa respecto al punto cuyo movimiento se evalúa.

Estos tres factores son determinantes en la respuesta del emplazamiento ante un cierto movimiento en su base, si bien en ocasiones, la geometría del problema permite asumir simplificaciones que llevan a prescindir de algunos de ellos.

3.4 MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE EFECTOS SÍSMICOS LOCALES ¹⁰

Se han aplicado numerosas y variadas metodologías en zonificación condicionadas por los medios y datos disponibles para estudiar los efectos de sitio. Por ello resulta difícil presentar de forma coherente un estado de la cuestión del tema; en cambio, es más fácil analizar el problema desde la perspectiva del método de análisis o forma de caracterización de tales efectos.

Sin embargo, en general la modelización del efecto del suelo se hace a través de la estimación de la función de transferencia, que consiste en la relación espectral entre un registro en un emplazamiento dado y un registro situado en un emplazamiento de referencia, que suele tratarse de roca dura. Puede ser también de importancia considerar el aumento de duración de la acción sísmica (Roca et al., 1999).

¹⁰ Ibid., p. 22.

Los métodos para la evaluación de los efectos sísmicos locales pueden clasificarse en empíricos y numéricos, pudiendo subdividirse los empíricos en métodos instrumentales y métodos indirectos (Delgado, 1997) (ver figura 3.8).

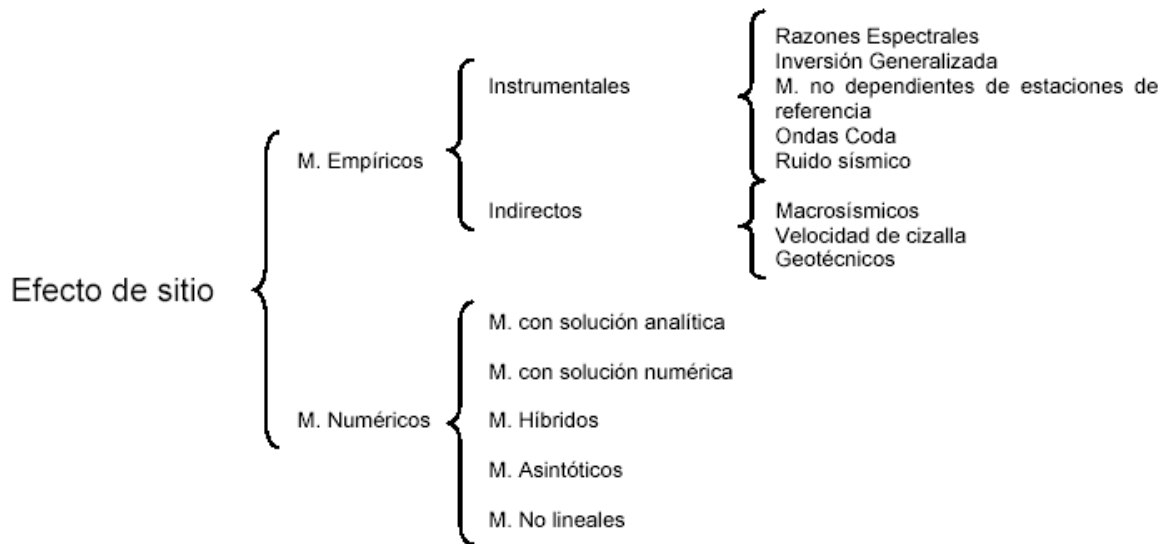


Figura 3.8. *Métodos y técnicas disponibles para el análisis de la respuesta del suelo y la zonificación sísmica de una región.*

3.4.1 Método empíricos instrumentales. Pueden basarse en diferentes tipos de datos: medidas con registros instrumentales de terremotos y medidas de ruido sísmico (*microtremors*).

Estos métodos tienen como objetivo fundamental determinar la función de transferencia del depósito superficial. El método de las relaciones espectrales determina la función de transferencia del suelo mediante la relación entre los registros sísmicos obtenidos en dos estaciones cercanas, estando una de ellas en afloramiento rocoso y llamada estación de referencia. Se cita también el denominado de razones espectrales H/V, el cual consiste en hallar la relación entre la componente horizontal y la vertical, asumiendo que los sedimentos superficiales son transparentes a la componente vertical del movimiento sísmico. Los resultados de esta técnica ponen de manifiesto que sólo se obtiene la frecuencia fundamental del sitio, pero ninguna información más acerca de su función de transferencia.

Los métodos de onda coda se basan en la fracción de energía que llega tras el paso de las fases directas de las ondas de volumen y superficiales. Éstos permiten obtener factores de amplificación dependientes del sitio y de la frecuencia, eliminando los efectos de la fuente y de la trayectoria, siendo el resultado, específico del sitio.

Los métodos de análisis espectral de ruido sísmico ambiental, parten de analizar el espectro de perturbaciones naturales o humanas del suelo. Se puede distinguir tres técnicas: a) Amplitudes espectrales, se considera que cualquier variación frecuencial del registro respecto al espectro plano en roca es debido a las capas superficiales. b) Razones espectrales, basado en el mismo fundamento que el método de razones

espectrales de terremotos. y c) Técnica de Nakamura (Nakamura, 1989), fundamentada teóricamente en el método de razones espectrales H/V. Únicamente se obtiene información de la frecuencia fundamental del depósito y no de la amplificación.

3.4.2 Método empíricos indirectos. Se incluyen aquellas técnicas basadas en observaciones experimentales de los daños provocados por la vibración sísmica, en relación con la naturaleza del suelo y sus propiedades físico-mecánicas. La relación entre la geología superficial del terreno y la severidad de la sacudida sísmica se ha puesto de manifiesto durante la ocurrencia de terremotos; de este modo han sido establecidas relaciones empíricas entre ésta y el incremento de la intensidad del movimiento del suelo (Secanell, 2002). El uso de estos métodos presenta la ventaja de que la información se obtiene directamente de mapas geológicos y puede ser aplicable a grandes áreas y a pequeños núcleos urbanos. Del mismo modo se puede aplicar correlaciones empíricas observadas en terremotos entre el incremento de intensidad sísmica y las propiedades dinámicas y físico-mecánicas de los materiales.

3.4.3 Métodos numéricos. La modelación numérica es especialmente útil para evaluación de los efectos de sitio, principalmente en los lugares en los que no se dispone de los requerimientos necesarios para utilizar métodos experimentales. Fundamentalmente es necesaria la evaluación de cuatro elementos:

- a. Selección de la señal de entrada adecuada al problema de análisis.
- b. Conocimiento dinámico del área a modelizar.
- c. Selección de los algoritmos de cálculo y
- d. Validación de los resultados.

En la selección de las señales de entrada se han de tener en cuenta dos factores:

- a. En métodos de simulación no lineales la señal de entrada debe producir el nivel de deformación de cizalla adecuada.
- b. La señal de entrada debe ser acorde al nivel de peligrosidad sísmica esperado en la zona de estudio.

Los parámetros característicos de esta señal de entrada son la aceleración pico, contenido frecuencial y duración, los cuales dependen de la magnitud del terremoto y de la distancia sitio-fuente. Diferentes métodos han sido desarrollados con el objetivo de definir la acción sísmica cuando no se dispone de registros reales: generación de acelerogramas compatibles con espectros de respuesta (Barbat y Canet, 1994; Bard et al., 1995; Colom, 1995; Yépez, 1996), métodos basados en modelos sismológicos (Brune, 1970; Catalán, 1995), uso de Funciones de Green Empíricas (Lachet, 1996; Heuze et al., 1997, etc.).

Por otro lado debe ser determinada la estructura y propiedades dinámicas del subsuelo; mucha de esta información requiere ensayos de campo y de laboratorio específicos, por lo que este tipo de información es poco usual y costoso de obtener.

Los algoritmos de cálculo se caracterizan según el tipo de modelización que hacen del problema, por el método de análisis y por las ecuaciones constitutivas del suelo. Una selección de los métodos de cálculo pueden ser encontrados por ejemplo en Alarcón, 1989; Figueras, 1994; Ledesma, 1996; Delgado, 1997; Suhadolc, 1997. Los métodos con solución analítica, son utilizados para estudiar medios estratificados horizontales, estos

métodos consideran la geometría del problema como un apilamiento de capas planas homogéneas sobre un semiespacio infinito (sentido 1D). Los métodos híbridos, surgen de la combinación de diferentes programas con el objetivo de aprovechar la capacidad específica de cada uno en el estudio de partes separables del problema. Los métodos asintóticos, son válidos para estructuras de grandes dimensiones en relación con las longitudes de onda involucradas, se pretende estudiar fenómenos a altas frecuencias.

Los métodos no lineales consideran ecuaciones constitutivas que reproducen el comportamiento no lineal del suelo; se basan en la teoría de la plasticidad y en la simulación directa de las curvas de histéresis esfuerzo de cizalla-deformación de cizalla. Los métodos de dominio son puramente numéricos y son los únicos capaces de tener en cuenta geometrías y geologías complejas a la vez; entre estos se encuentran los métodos de las diferencias finitas, y los elementos finitos y los pseudo-espectrales. Los métodos de contorno consideran las condiciones de borde del área estudiada para obtener las soluciones; entre estos están los directos e indirectos según planteen las soluciones en función de los desplazamientos y tracciones o en términos de las fuerzas o momentos en la frontera (Delgado, 1997).

Finalmente siempre que sea posible es aconsejable la validación de los resultados aportados por los métodos numéricos a partir de datos experimentales del movimiento del suelo, debido a las numerosas fuentes de incertidumbre asociadas a los parámetros utilizados (Cid, 1998).

4 RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN

4.1 BASE DE DATOS GEOTÉCNICOS

Para realizar la base de datos geotécnicos de las 23 zonas de estudio seleccionadas, se revisó el inventario físico de los estudios geotécnicos existentes en la empresa Ingeniería de Suelo y Cimentaciones de la ciudad de Pasto, desde 1985 a la fecha, firma que cuenta con aproximadamente 550 estudios distribuidos alrededor del departamento de Nariño, pero principalmente de la ciudad de Pasto, del inventario se seleccionaron 41 estudios que se resumen en una base de datos en formato Excel como se detalla en la Tabla No. 4.1., mostrando en la columna 1 el número de referencia para efectos de este trabajo, en la columna 2 el número de referencia de la firma responsable, en la columna 3 el sector donde se ubica el estudio y por último el nombre de dichos estudios, anotando que éstos, incluyen más de 185 perforaciones y 944 ensayos de laboratorio.

En la base de datos se realizó una tabla de resumen de cada uno de los estudios seleccionados, presentando el número de exploración, espesor del estrato, profundidad de la muestra analizada, descripción, humedad, altura del nivel freático, granulometría referente al pasante de los tamices No. 4 y No. 200, límites, Índice de plasticidad, clasificación U.S.C, penetración estándar N_{spt} , resistencia sin drenar, peso unitario seco y húmedo, cohesión y ángulo de fricción interna, para algunos casos, como se muestra en la Tabla No. 4.2.

Tabla 4.1. Estudios geotécnicos seleccionados.
Fuente: Ingeniería de Suelos y Cimentaciones Limitada.

| No. | ESTUDIO No. | SECTOR | NOMBRE ESTUDIO |
|-----|-------------|--------------------|---|
| 1 | 50 | PARQUE INFANTIL | Estudio de Suelos y Recomendaciones Compañía Colombiana de Tabaco S.A. Pasto Diciembre 1992 |
| 2 | 53 | TEJAR | Estudio de Suelos y Recomendaciones Coliseo Deportivo El Tejar Gobernación de Nariño Mayo de 1993 |
| 3 | 66 | PANDIACO | Estudio de Suelos y Recomendaciones Universidad Cooperativa Octubre de 1993 |
| 4 | 96 | PARQUE INFANTIL | Estudio de Suelos y Recomendaciones Edificio Torre Toledo Octubre de 1994 |
| 5 | 104 | MORASURCO | Estudio Geotécnico Edificio Francisco Martínez Enero de 1995 |
| 6 | 115 | MORASURCO | Estudio Geotécnico Edificio Daría Ortiz Febrero de 1995 |
| 7 | 129 | PARQUE INFANTIL | Estudio Geotécnico Edificio Torre Sevilla Septiembre de 1995 |
| 8 | 148 | BETHLEMITAS | Estudio Geotécnico y Análisis de Estabilidad de Talud Ampliación Colegio Bethlemitas Pasto Marzo de 1994. |
| 9 | 170 | NUEVA ARANDA | Estudio Geotécnico Urbanización La Nueva Aranda Pasto Diciembre de 1996 |
| 10 | 180 | VALLE DE ATRIZ | Estudio Geotécnico Centro Comercial Valle de Atriz Pasto Enero de 1997 |
| 11 | 194 | BARRIO LA PAZ | Estudio Geotécnico Vial Pav. Vías Pasto: H. Civil, La Paz, Coliseo, El Rosario, Aqualongo y Tamasagra Julio de 1997 |
| 12 | 240 | PANDIACO | Estudio Geotécnico Centro Parroquial Pandiaco Julio de 1998 |
| 13 | 243 | AQUINE | Estudio Geotécnico Urbanización Rincón de Aquine Pasto Agosto de 1998 |
| 14 | 252 | POTRERILLO | Estudio Geotécnico Edificio Cra. 13 No. 17 – 21 Pasto Noviembre de 1998 |
| 15 | 266 | POTRERILLO | Estudio Geotécnico Conjunto Comercial Madrial Marzo de 1999 |
| 16 | 285 | LA COLINA | Estudio Geotécnico Edificio Calle 16 No. 43 – 21 D:A ROMAN Septiembre de 1999 |
| 17 | 289 | COLEGIO LIBERTAD | Estudio Geotécnico Ampliación Cobertura Instituto Femenino Libertad Septiembre de 1999 |
| 18 | 290 | INEM | Estudio Geotécnico Colegio INEM Octubre de 1999 |
| 19 | 293 | SENA | Estudio Geotécnico Muro de Contención Vía acceso al SENA Noviembre de 1999 |
| 20 | 316 | LAS LUNAS | Estudio Geotécnico Edificio Man D1 Lote 27 El Progreso Abril de 2000 |
| 21 | 326 | EMPOPASTO S.F | Estudio Geotécnico Planta de Tratamiento San Felipe Empopasto Junio de 2000 |
| 22 | 332 | JAVERIANITO | Estudio Geotécnico Cubierta Colegio Javeriano Julio de 2000 |
| 23 | 343 | PANDIACO | Estudio Geotécnico Casa de la Ciencia y el Juego Noviembre de 2000 |
| 24 | 344 | VALLE DE ATRIZ | Estudio Geotécnico Sede Universidad San Martín Noviembre de 2000 |
| 25 | 345 | VALLE DE ATRIZ | Estudio Geotécnico Universidad San Martín Calle 18 Diciembre de 2000 |
| 26 | 369 | POTRERILLO | Estudio Geotécnico Bodegas Ferretería El Potrerillo Octubre de 2001 |
| 27 | 408 | PANDIACO | Estudio Geotécnico Complementario Escuela de Música Centro Cultural Pandiaco Pasto Febrero 10 de 2003 |
| 28 | 421 | PLAZA DEL CARNAVAL | Estudio Geotécnico Obras de Contención Plaza del Carnaval San Juan de Pasto |
| 29 | 433 | UDENAR F.A | Estudio Geotécnico Estabilidad de Talud Facultad de Artes UDENAR Julio de 2003 |
| 30 | 463 | HPTAL DPTAL | Estudio Geotécnico para el Análisis de Vulnerabilidad Hospital Departamental de Nariño E.S.E. San Juan de Pasto Octubre 6 de 2004 |
| 31 | 470 | VALLE DE ATRIZ | Estudio Geotécnico Refugio del Bloque Esquinero Calle 19C con Cra. 44 y Parquadero Adjunto Conjunto Refugio del Valle de Atriz Pasto Noviembre 29 de 2004 |
| 32 | 483 | NUEVO JAVERIANO | A, B y C Estudio Geotécnico Nuevo Colegio San Francisco Javier-Pasto Marzo 2 de 2005 |
| 33 | 486 | CAJA AGRARIA | Estudio Geotécnico Remodelación Antiguo Edificio Caja Agraria – Nariño Marzo 11 de 2005 |
| 34 | 495 | ESTADIO LIBERTAD | Ampliación Estadio Libertad Estudio y Diseño Geotécnico Tanque de Almacenamiento de Agua Agosto 4 de 2005 |
| 35 | 502 | VALLE DE ATRIZ | Estudio Geotécnico Edificio Valle de Atriz Torre 3 2 de Noviembre de 2005 |
| 36 | 514 | EMPOPASTO CENTE. | Estudio Geotécnico Estabilidad Ladera Acueducto Centenario Empopasto-Nariño Dic. 14 de 2005 |
| 37 | 521 | CAJA AGRARIA | Estudio Geotécnico para Chequeo Estructural Bodegas Antigua Caja Agraria – Pasto Feb.2 de 2006 |
| 38 | 522 | PEDAGOGICO | Estudio Geotécnico Construcción de Aulas Instituto Pedagógico – Pasto Enero 31 de 2006 |
| 39 | 523 | VALLE DE ATRIZ | Estudio Geotécnico Edificio LSA del Pacífico – Pasto Enero 31 de 2006 |
| 40 | 527 | MORASURCO | Estudio Geotécnico Aulas Facultad de Música Universidad de Nariño – Centro – Pasto Febrero 27 2006 |
| 41 | 549 | UDENAR F.ING | Estudio Geotécnico FACIA - FACEA Universidad de Nariño |

| Exploración No. | Espesor estrato (m) | Prof. (m) | Descripción | Humedad (%) | Granulom. | | | Límites | | | Clasificación U.S.C | Nspt | Resistencia sin drenar Qu (k/cm ²) | P.Unitario (t/m ³) | | Corte Directo | |
|-----------------|---------------------|-----------|--|-------------|-----------|--------|--------|---------|-------|----|---------------------|------|--|--------------------------------|--------|------------------------|-------|
| | | | | | No. 4 | No.200 | % pasa | LL | LP | LP | | | | Seco | Húmedo | c (k/cm ²) | φ (°) |
| P - 1 | 0 - 5. | 2.00 | Suelo orgánico poco plástico color gris oscuro con olor característico | 69.89 | 100.00 | 61.38 | 48.98 | 9.44 | 39.54 | OL | 5 | | | | | | |
| | | 4.00 | Suelo orgánico poco plástico color negro con olor característico | 94.63 | 100.00 | 84.50 | 43.20 | 13.89 | 29.31 | OL | 6 | | | | | | |
| | 5 - 13. | 6.00 | Arena limosa color gris oscuro | 32.75 | 99.66 | 20.39 | NL | | NP | SM | 7 | | | | | | |
| | 13 - 13.6 | 10.00 | Arena limosa color gris oscuro | 77.85 | 99.32 | 32.58 | NL | | NP | SM | 40 | | | | | | |
| | | 13.60 | Arena limosa color verde | 74.41 | 99.36 | 54.33 | NL | | NP | SM | 40 | | | | | | |

| NIVEL FREÁTICO | |
|----------------|----------|
| Exploración | Prof (m) |
| P - 1 | 1.70 |

Tabla 4.2. Resumen estudio geotécnico No. 495 Sector Estadio Libertad

La ubicación de los sitios en análisis se muestra en la figura 4.1.

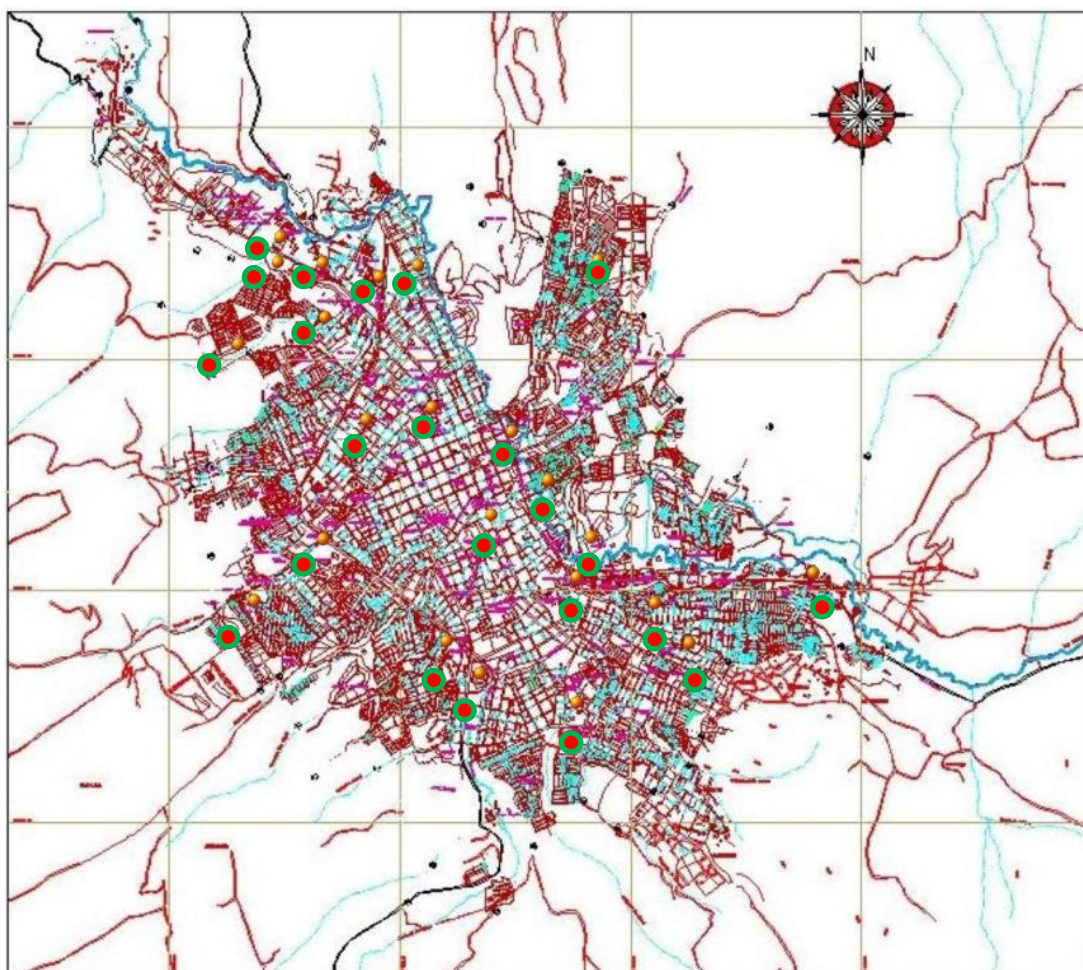


Figura 4.1. Localización geográfica sectores de medición.

4.2 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DINÁMICOS A PARTIR DE PRUEBAS ESTÁTICAS

Debido a la disponibilidad de pruebas estáticas en los estudios geotécnicos seleccionados, se buscará seleccionar las correlaciones necesarias para obtener los parámetros dinámicos a partir de éstas.

4.2.1 Obtención de las columnas de suelo representativas de las zonas de estudio. Con el propósito de obtener las columnas de suelo representativas para cada zona de estudio, se tienen en cuenta las tablas de resumen de los estudios geotécnicos seleccionados para tal fin. En la Tabla 4.3, se muestra un ejemplo para el sector Torres Valle de Atriz.

Estudio Geotécnico Edificio LSA del Pacífico – Pasto Enero 31 de 2006

| Exploración No. | Espesor estrato (m) | Prof. (m) | Descripción | Humedad (%) | Granulom. | | | % pasa | | | Límites | | | Clasificación U.S.C | Nspt | Resistencia sin drenar Qu (k/cm ²) | P.Unitario (t/m ³) | | Corte Directo | |
|-----------------|---------------------|-----------|--|-------------|-----------|--------|-------|--------|-------|-------|---------|------------------------|-------|---------------------|------|--|--------------------------------|--|---------------|--|
| | | | | | No. 4 | No.200 | L.L | I.P | L.P | Seco | Húmedo | c (k/cm ²) | φ (°) | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A - 1 | 0 - 4.6 | 3.00 | Limo poco plástico color café claro | 25.95 | 100.00 | 64.30 | 23.62 | 1.03 | 22.59 | ML | 5 | | | | | | | | | |
| | | 3.90 | Arena limosa uniforme color tabaco claro | 18.29 | 65.40 | 9.30 | NL | | NP | SM-SP | 5 | | | | | | | | | |
| | | 4.60 | Limo poco plástico color café claro | 53.22 | 99.90 | 79.60 | 25.29 | 0.88 | 24.41 | ML | 6 | | | | | | | | | |
| A - 2 | 0 - 4.8 | 2.30 | Limo muy plástico color café claro | 30.53 | 99.10 | 64.90 | 57.76 | 18.27 | 39.49 | MH | 5 | 2.22 | 1.44 | 1.67 | | | | | | |
| | | 4.80 | Limo poco plástico color café oscuro | 53.76 | 98.40 | 65.00 | 42.97 | 9.66 | 33.31 | ML | 5 | | 1.32 | 1.57 | 0.74 | 5.5 | | | | |
| P - 1 | 0 - 5.5 | 5.5 - 8 | Arena limosa color crema oscuro | 27.86 | 95.00 | 25.40 | NL | | NP | SM | 5 | | | | | | | | | |
| | | 8 - 10.5 | Limo poco plástico color café oscuro | 20.76 | 99.40 | 61.60 | NL | | NP | ML | 33 | | | | | | | | | |
| | | 0 - 5.5 | Limo poco plástico color café | 23.01 | 98.30 | 55.10 | 40.76 | 9.74 | 31.02 | ML | 5 | | | | | | | | | |
| P - 2 | 5.5 - 11.5 | 6.00 | Limo poco plástico color gris | 32.90 | 95.70 | 54.20 | 41.03 | 12.85 | 28.18 | ML | 6 | | | | | | | | | |
| | | 8.00 | Arena limosa color gris | 42.09 | 94.40 | 45.90 | 32.17 | 1.43 | 30.74 | SM | 23 | | | | | | | | | |

| NIVEL FREÁTICO | |
|----------------|----------|
| Exploración | Prof (m) |
| A - 1 | NF |
| A - 2 | NF |
| P - 1 | NF |
| P - 2 | NF |

Tabla 4.3. Resumen estudio geotécnico No. 523 Sector Torres Valle de Atriz.

Los estudios y perforaciones disponibles se concentran en los primeros metros del subsuelo, con máximos a 13.75 metros como en el caso del Estadio Libertad, siendo la profundidad media de 7.40 metros, en donde se han identificado materiales como limos, arenas, arcillas y mezclas de estos, además de cenizas provenientes del Volcán Galeras.

El proceso seguido para la obtención de las columnas estratigráficas es el siguiente:

- A partir de la base de datos de los estudios geotécnicos seleccionados, se procedió a escoger emplazamientos que tienen ensayos relacionados con la obtención de las propiedades mecánicas estáticas encontrando, que al 100% de los estudios seleccionados se les ha realizado el ensayo de penetración estándar (Nspt), parámetro que debido a su uso universal y a la existencia de diferentes correlaciones con las propiedades dinámicas de los materiales¹¹, se seleccionó para la obtención de las propiedades dinámicas en los diferentes perfiles de interés, un ejemplo de este procedimiento se muestra en el numeral 4.2.2.

¹¹ CORAL MONCAYO, Hugo. Utilización de métodos experimentales y de simulación numérica para la microzonificación sísmica de áreas urbanizadas en Andorra. Barcelona, 2002. p. 58. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. E. T. S. Ingenieros de Caminos, C. y P. Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica.

- Se calculó el promedio horizontal de los espesores de los diferentes estratos de las exploraciones de cada estudio geotécnico de interés para las zonas de estudio. A cada estrato obtenido se le asocia un valor de penetración estándar y un valor de peso unitario, valores que deben ser conocidos para el cálculo de los parámetros dinámicos de cada material.

Para la determinación del peso unitario se procedió a tomar todos los valores presentes en los resúmenes de los estudios seleccionados asociados a cada material calculando su promedio, obteniendo valores consistentes para todos los materiales presentes en las columnas estratigráficas definidas para cada sector en estudio. Estos valores se detallan en la tabla 4.4.

Los valores de pesos unitarios de los materiales de más livianos a pesados se distribuyen de la siguiente manera, comienzan los suelos orgánicos, ceniza, limos de baja, mediana y alta plasticidad; seguidos de una grava limosa, arenas y arcillas de baja plasticidad, éstas últimas se distribuyen alternadamente, y finalmente arenas limosas y gravas bien gradadas; anotando que en el último grupo se encuentran arcillas de alta plasticidad.

| CLASIFICACIÓN U.C.S.C | DENSIDAD | | MATERIAL |
|-----------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| | γ (t/m ³) | γ (KN/m ³) | |
| OH | 1.455 | 14.26 | SUELO ORGÁNICO |
| CENIZA | 1.510 | 14.80 | CENIZA |
| ML - SM | 1.550 | 15.19 | LIMO MEDIANAMENTE PLÁSTICO |
| ML | 1.575 | 15.44 | LIMO POCO PLÁSTICO |
| GM | 1.595 | 15.63 | GRAVA LIMOSA |
| MH | 1.596 | 15.64 | LIMO DE ALTA PLASTICIDAD |
| SM | 1.614 | 15.82 | ARENA LIMOSA |
| OH - OL | 1.620 | 15.88 | LIMO ORGÁNICO MEDIANAMENTE PLÁSTICO |
| OL | 1.679 | 16.45 | LIMO ORGÁNICO |
| ML - MH | 1.690 | 16.56 | LIMO MEDIANAMENTE PLÁSTICO |
| SM - ML | 1.700 | 16.66 | ARENA LIMOSA DE BAJA PLASTICIDAD |
| CL | 1.767 | 17.32 | ARCILLA DE BAJA PLASTICIDAD |
| GW | 1.770 | 17.35 | GRAVA BIEN GRADADA |
| SC | 1.771 | 17.36 | ARENA ARCILLOSA |
| CL - ML | 1.830 | 17.93 | ARCILLA LIMOSA DE BAJA PLASTICIDAD |
| SM - SC | 1.900 | 18.62 | ARENA LIMOARCILLOSA |
| GC - GW | 1.915 | 18.77 | GRAVA ARCILLOSA BIEN GRADADA |
| CH | 1.920 | 18.82 | ARCILLA DE ALTA PLASTICIDAD |

Tabla 4.4. Estimación de los valores de densidad para los diferentes materiales de las zonas en estudio.¹²

¹² Valores obtenidos del promedio de los datos obtenidos de los resúmenes de los estudios geotécnicos mostrados en la Tabla 4.1.

4.2.2 Estimación de los parámetros dinámicos de los suelos en las zonas de estudio¹³. Para obtener una columna estratigráfica representativa para cada perfil con sus propiedades dinámicas, se usó el siguiente procedimiento:

- Se realizó una revisión bibliográfica referente a la obtención de parámetros dinámicos como la velocidad de ondas de corte o máximo esfuerzo cortante de los suelos a partir de correlaciones con el ensayo de penetración estándar, teniendo en cuenta los materiales predominantes en cada perfil estratigráfico establecido para cada zona de estudio.

Las correlaciones encontradas y empleadas para efectos de este trabajo se muestran en la Tabla 4.5. y se encuentran graficadas en la figura 4.2.

| MATERIAL | CORRELACIÓN Vs (m/s) |
|---|-------------------------------|
| Todos (1) | $62 \times N^{0.60}$ |
| Arena (2) | $104 \times N^{0.5}$ |
| Todos (8) | $85.35 \times N^{0.348}$ |
| Todos (9) | $97 \times N^{0.314}$ |
| Arcilla Aluvial (9) | $107 \times N^{0.274}$ |
| Arena Aluvial (9) | $87.8 \times N^{0.292}$ |
| Grava Aluvial (9) | $75.4 \times N^{0.351}$ |
| Arcilla Diluvial (9) | $128 \times N^{0.257}$ |
| Arena Diluvial (9) | $110 \times N^{0.285}$ |
| Grava Diluvial (9) | $136 \times N^{0.246}$ |
| Arcilla (10) | $100 \times N^{1/3}$ |
| Arena (10) | $80 \times N^{1/3}$ |
| Todos (14) | $65.58 \times N^{0.502}$ |
| Arena (16) | $57.4 \times N^{0.49}$ |
| Arcilla (16) | $114.43 \times N^{0.31}$ |
| Limos (16) | $150.64 \times N^{0.32}$ |
| Arena Limosa SM (15) | $104.7 \times N^{0.296}$ |
| | $93.11 \times (N+1)^{0.329}$ |
| Arcilla poco plástica CL (15) | $154.17 \times N^{0.207}$ |
| | $138.36 \times (N+1)^{0.242}$ |
| Limo poco plástico ML (15) | $126.18 \times N^{0.268}$ |
| | $103.99 \times (N+1)^{0.334}$ |
| Arcilla Limosa poco plástica CL – ML (15) | $146.59 \times N^{0.222}$ |
| | $129.42 \times (N+1)^{0.262}$ |

1. Kanai, et al., 1966
 2. Shibata, 1970
 8. Ohta i Goto, 1978
 9. Imai i Tonouchi, 1982

10. JRA, 1980
 14. Lin, 1984
 15. Lee, 1992
 16. Lee, 1990

Tabla 4.5. Correlaciones de Vs con el ensayo de penetración estándar según diversos estudios.

¹³ CID RAMOS, Javier. Estimación de los parámetros dinámicos de los suelos, procedimiento y aplicación a Barcelona. Barcelona, 1996. p. 71. Tesis de Maestría. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona.

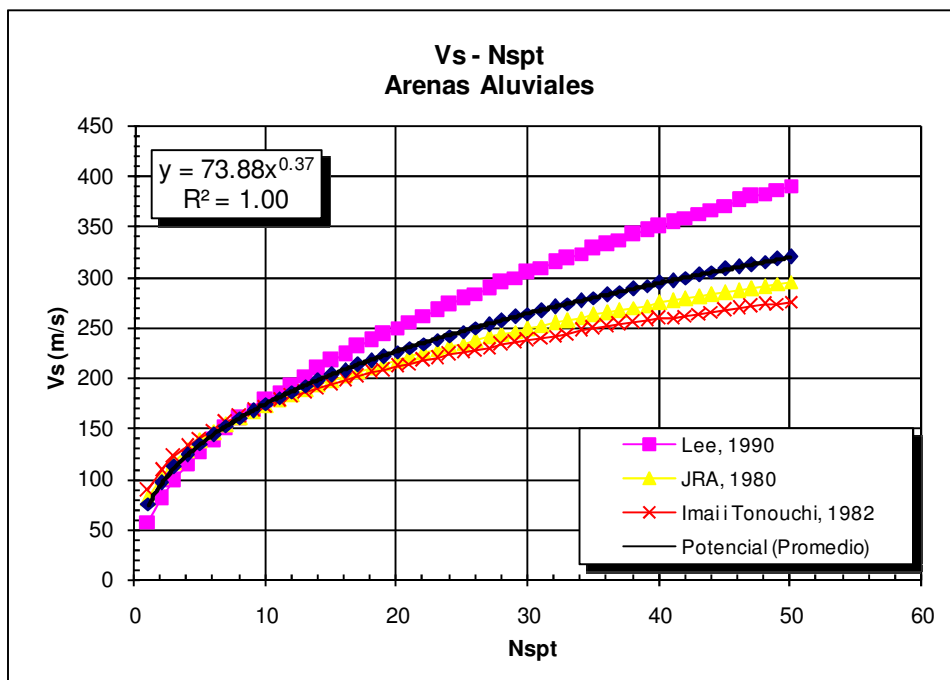
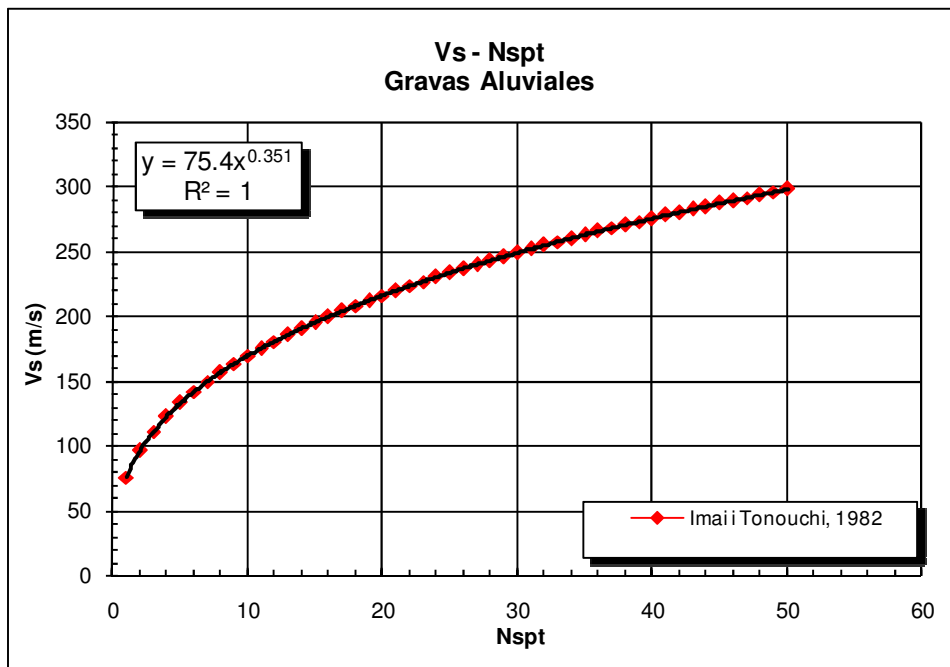


Figura 4.2. Correlaciones de Vs con el ensayo de penetración estándar según diversos estudios.^{14 15}

¹⁴ Ibid., p. 36.

¹⁵ CORAL MONCAYO, Hugo. Utilización de métodos experimentales y de simulación numérica para la microzonificación sísmica de áreas urbanizadas en Andorra. Barcelona, 2002. p. 59. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. E. T. S. Ingenieros de Caminos, C. y P. Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica.

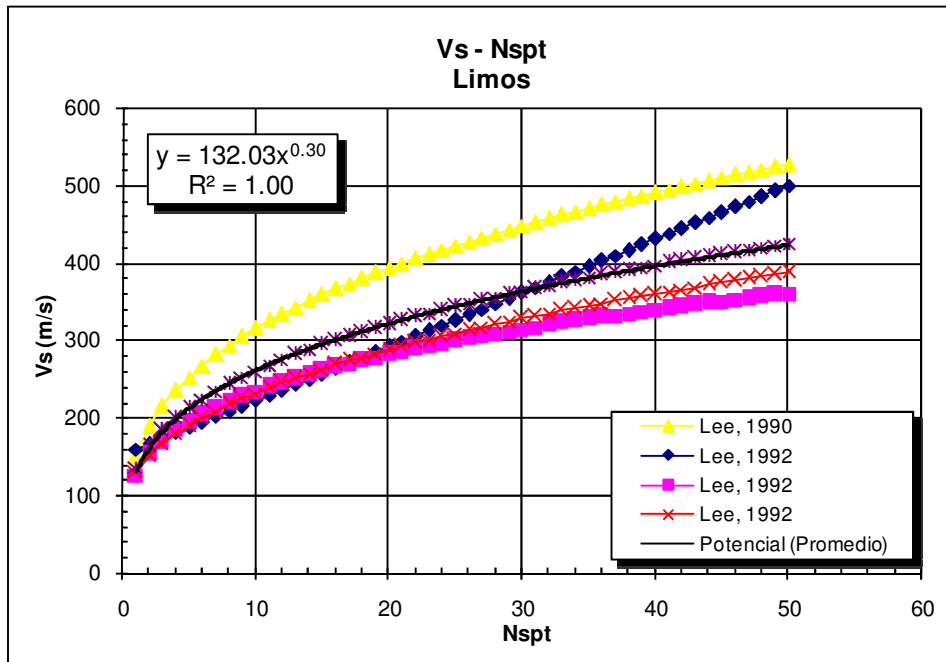
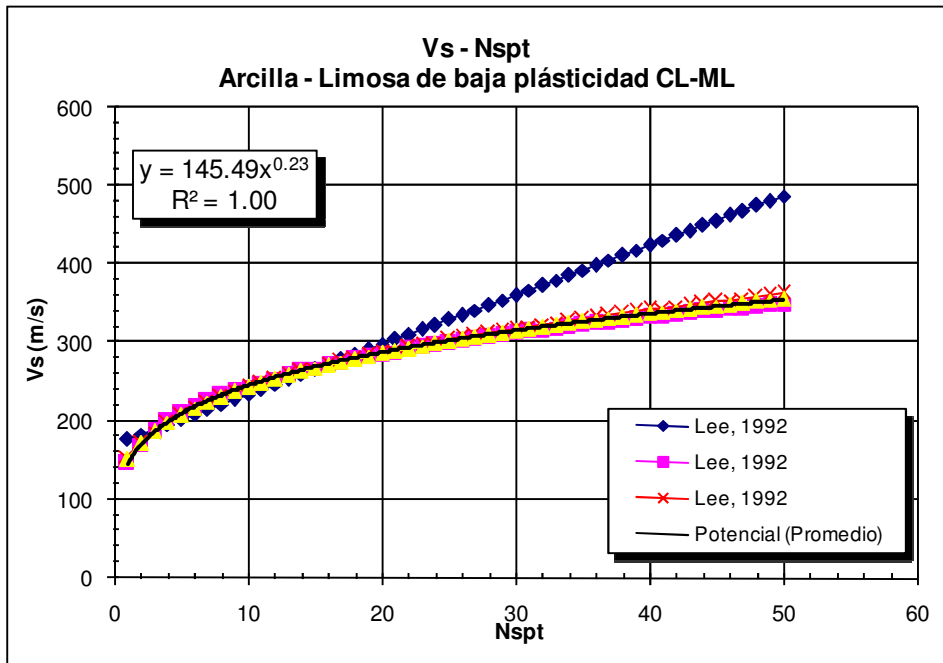


Figura 4.2. Correlaciones de Vs con el ensayo de penetración estándar según diversos estudios. (Continuación).

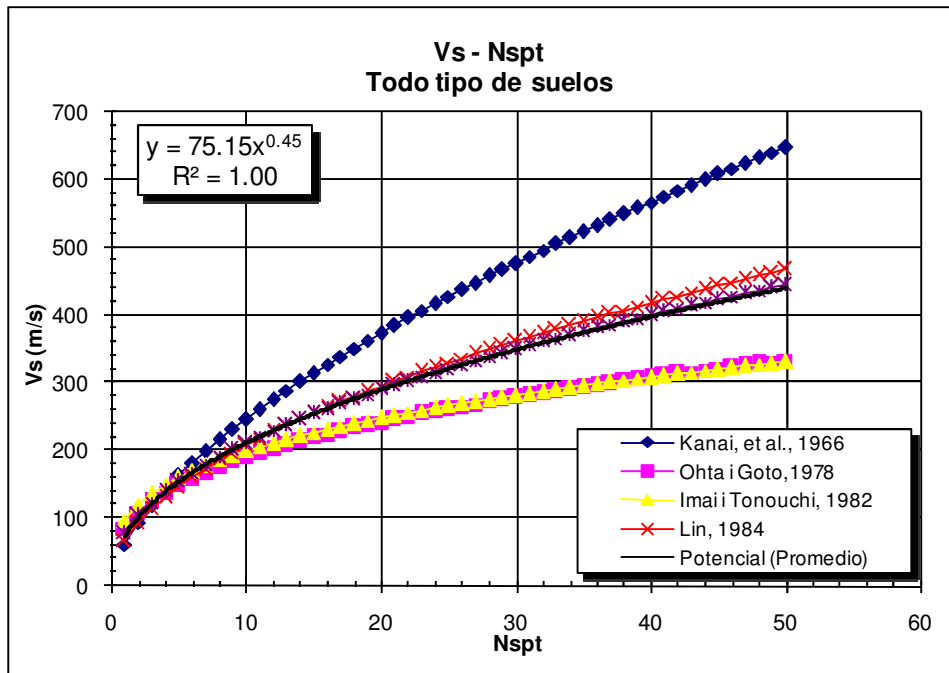
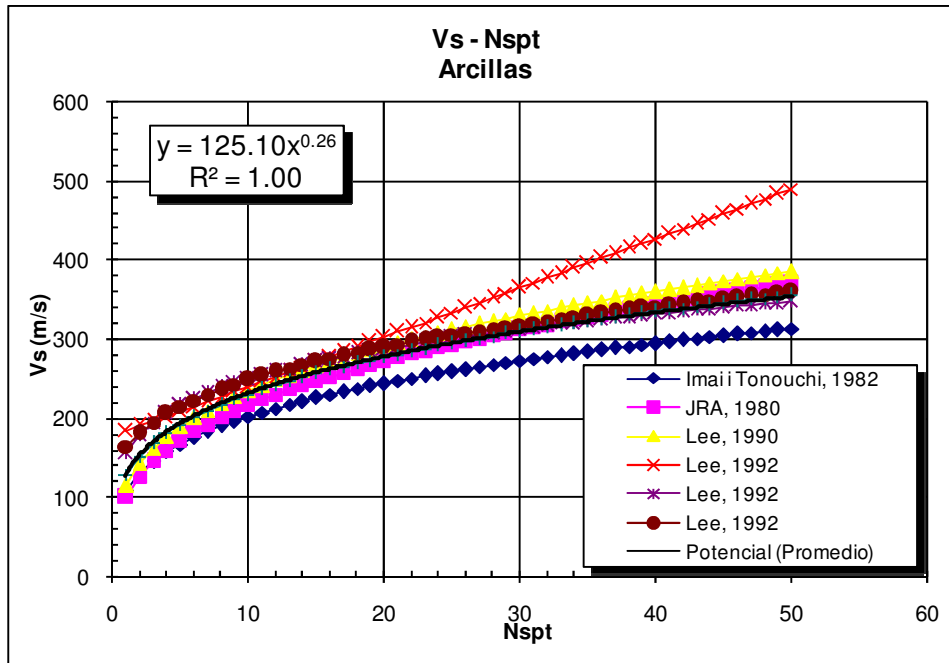


Figura 4.2. Correlaciones de Vs con el ensayo de penetración estándar según diversos estudios. (Continuación).

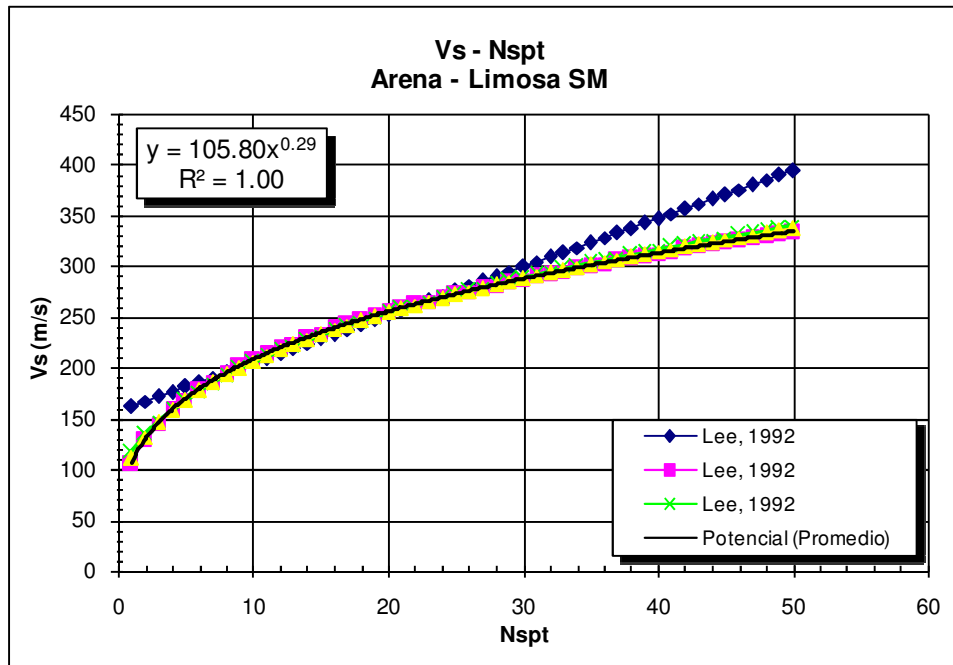


Figura 4.2. Correlaciones de Vs con el ensayo de penetración estándar según diversos estudios. (Continuación).

- Una vez obtenido el valor de Nspt, se procedió a usar las diferentes gráficas de la figura 4.2. o su correspondiente ecuación de correlación de la Tabla 4.5., para cada material y así obtener la velocidad de ondas de corte.
- Para la obtención del $G_{m\acute{a}x}$, se procedió a adoptar un valor de la densidad para cada material según la tabla 4.4.
- Se obtuvo el módulo de corte dinámico máximo, $G_{m\acute{a}x}^{15}$, con la expresión:

$$G_{m\acute{a}x} = V_s^2 \times \rho$$

- Como resultado de este proceso se obtuvo las propiedades dinámicas para los perfiles estratigráficos de los sectores en análisis. Un ejemplo de estos se muestra en la Tabla 4.6 y la figura 4.3.

¹⁵ COLINDRES SELVA, Rafael. Dinámica de suelos y estructuras. EDITORIAL LIMUSA, S.A. de C.V. México, 1993. Unidad 4, p. 10.

| Profundidad (m) | Nspt | Vs (m/s) | G _{máx} (KN/m ²) | P. Unitario (KN/m ³) |
|-----------------|------|----------|---------------------------------------|----------------------------------|
| 0 | 6 | 303,64 | 151703,20 | 16,45 |
| 5 | 6 | 303,64 | 151703,20 | 16,45 |
| 5 | 7 | 194,09 | 59584,86 | 15,82 |
| 13 | 7 | 194,09 | 59584,86 | 15,82 |
| 13 | 40 | 321,75 | 163744,50 | 15,82 |
| 13.6 | 40 | 321,75 | 163744,50 | 15,82 |
| 13.6 | 45 | 332,94 | 175332,15 | 15,82 |
| 13.75 | 45 | 332,94 | 175332,15 | 15,82 |

Tabla 4.6. Parámetros dinámicos calculados a partir del ensayo de penetración estándar Nspt para el perfil sector Estadio Libertad.

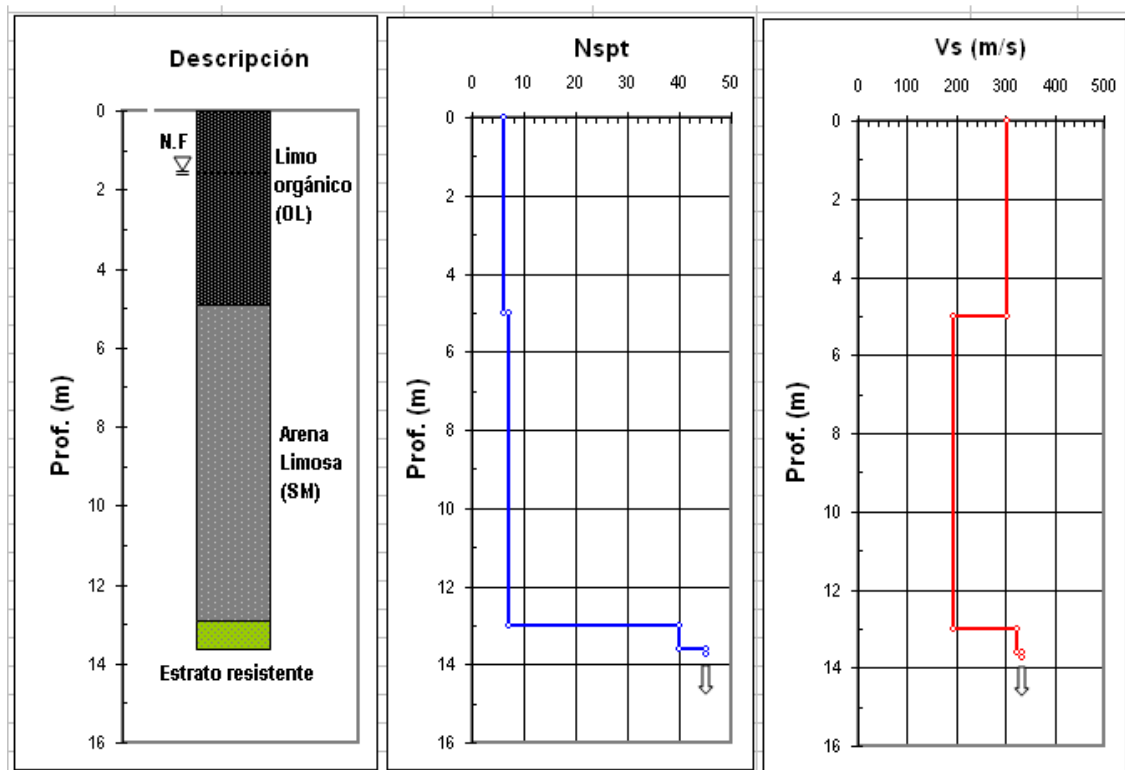


Figura 4.3. Estratigrafía y parámetros dinámicos sector Estadio Libertad.

4.3 PERIODO DE RESONANCIA DEL SUELO EN VIBRACIONES CAUSADAS POR FUERZAS CORTANTES¹⁶

En una sección, de un cuerpo, si aceptamos al movimiento como plano y unidireccional y establecemos el equilibrio dinámico, como se muestra en la figura 4.4.

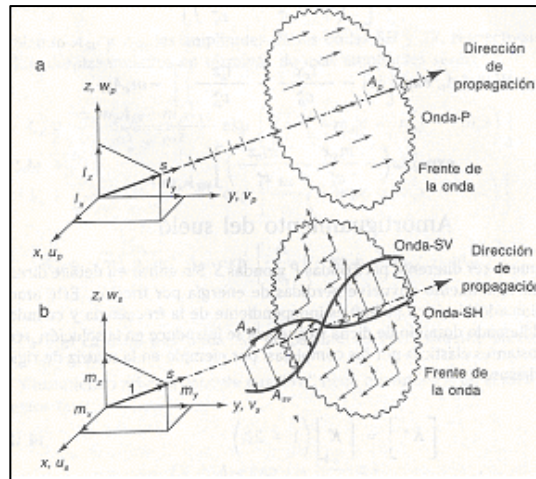


Figura 4.4. Movimiento de ondas "P" y "S".

La ley que regula dicho movimiento fue establecida como:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

siendo:

$$a = \frac{m}{F_f AG}$$

F_f = Factor de forma.

m_u = Masa uniforme distribuida por unidad de longitud.

A = Área de la sección transversal.

G = Módulo de rigidez al cortante definido como " μ " o módulo dinámico.

En cada sección de la masa podemos establecer:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

Se adopta como solución de las ecuaciones:

¹⁶ COLINDRES SELVA, Rafael. Dinámica de suelos y estructuras. EDITORIAL LIMUSA, S.A. de C.V. México, 1993. Unidad 4, p. 86 a 97.

$$U(X_1, t) = F(x)F(t)$$

siendo $F(t)$ el mismo valor para todas las ecuaciones, es decir constante, y $F(x)$ diferente para cada sección. Para cada sección tendríamos:

$$F(t) = C \text{sen}(\omega t + \tau)$$

$$F_1(x) = A_1 \text{sen}(\lambda_1 x + \phi_1)$$

$$F_2(x) = A_2 \text{sen} \lambda_2 (x - L_1 + \phi_2)$$

$$F_n(x) = A_n \text{sen} \lambda_n (x - \sum_1^{n-1} L + \phi_n)$$

definiendo a:

$$\lambda_k^2 = \frac{\gamma \omega^2}{\rho G F_f} = \frac{\rho \omega^2}{G F_f}$$

y si definimos a

$$\frac{G}{\rho} = v_s^2$$

tendremos:

$$\lambda_k^2 = v_s^2 \frac{\omega^2}{F_f}$$

Si adoptamos como factor de forma

$$F_f = 1$$

$$\lambda_k^2 = v_s^2 \omega^2$$

y a los valores de: $\omega, \lambda, A_1, A_2, \dots, A_n, \phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$, los podemos establecer de las condiciones de frontera y condiciones de apoyo.

Para el caso de una estructura de cortante, muro de concreto o ladrillo, el valor de λ_k^2 , sería:

$$\lambda^2 = \frac{\gamma \omega^2}{G F_f}$$

F_f = Factor de forma = 1.20 para sección rectangular.

λ = Peso por unidad de volumen.

g = Aceleración de la gravedad.

Analizamos el caso de una columna de suelo que, descansa sobre roca o suelo firme, que según el Comité de Sismología de la Asociación de Ingenieros Estructurales de California (1975), queda definido como cualquier material con velocidades de cortante V_s iguales o superiores:

$$v_s \geq 2500 \frac{ft}{seg}$$

$$v_s \geq 762 \frac{m}{seg}$$

para deformaciones del orden $\gamma = 0.0001\%$ y no descansa sobre materiales que tengan velocidad de cortantes menores que las anteriores.

La Universidad de Stanford, en su código para Guatemala, define por su parte:

Suelo firme: $v_s = 600 \frac{m}{seg}$

Suelo suave: $150 \leq v_s \leq 600 \frac{m}{seg}$

De acuerdo a los planteamientos anteriores, el estudio de una masa de suelo se puede hacer apoyándose en las ecuaciones de la dinámica clásica, no perdiendo de vista siempre que el suelo nunca podrá ser una masa homogénea, isotrópica y elástica.

Para hacer el análisis de una masa de suelos sometido a un impulso horizontal, originado en el lecho de roca sobre el que descansa dicha masa (ver figura 4.5), se deben hacer la siguiente hipótesis:

1. Los desplazamientos horizontales de los estratos se debe exclusivamente a su deformación por cortante no interviniendo en consecuencia la flexión.
2. Las deformaciones son perfectamente elásticas.
3. Las características mecánicas del suelo, así como la distribución y espesor del mismo, son conocidas y se mantiene aproximadamente constantes en un área lo suficientemente extensa, como para prescindir del efecto de confinamiento que pudiera ocasionarle estratos vecinos de características diferentes.

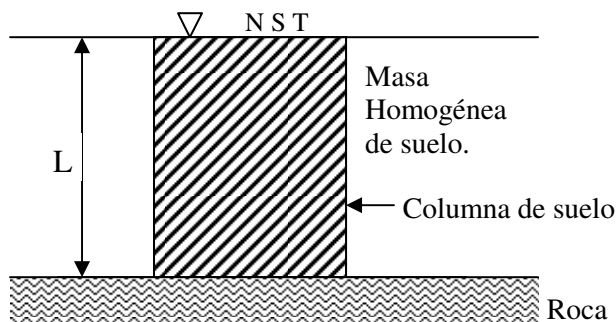


Figura 4.5. Modelo columna de suelo.

Tendremos así que la solución de la ecuación que regula el movimiento estaría resuelta por los siguientes valores:

$$u(x,t) = (A_1 \text{sen} \lambda x)(C \text{sen} \omega t)$$

si hacemos $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$, es decir cortante = 0 para $X = L$

$$\text{Cos} \lambda x = 0; \lambda = \omega v_s L$$

$$\omega v_s L = \frac{\pi}{2} (2n-1)m = 1,2,3\dots$$

$$\omega = \left(\frac{2n-1}{2L} \right) \pi \sqrt{\frac{\rho}{\mu}}; T = \frac{2\pi}{\omega}$$

$$T = \frac{4L}{(2n-1)} \sqrt{\frac{\rho}{\mu}}, (\text{seg})$$

Para el primer modo de vibración se tiene: $n = 1$

$$L = D; \quad T_1 = \frac{4D}{v_s}, (\text{seg})$$

Para el segundo modo $n = 2$

$L = D$ Espesor del estrato

$$T_2 = \frac{1}{3} \times \frac{4D}{v_s} (\text{seg})$$

Para el tercer modo

$$T_3 = \frac{1}{5} \times \frac{4D}{v_s}$$

VALORES QUE RESULTAN APROXIMADOS

Haremos notar que se ha observado que este valor de T del primer modo coincide con el pico que se registra en los acelerogramas, registrándose además los valores de los otros periodos, es decir otros picos (Peak).

Para suelos estratificados, la ecuación, aplicaría para cada estrato:

$$\Delta T_i = \frac{4D_i}{(v_s)_i}$$

4.3.1 Cálculo de los modos de vibración del suelo por métodos numéricos. Es posible tratar el fenómeno de vibración del suelo estratificado como un movimiento de vibración libre de varios grados de libertad, formado por los diferentes estratos geológicos.

La vibración libre, producto de cada sacudida sísmica, sería amortiguado por rozamiento, que hace que dure solamente lo que permite dicho amortiguamiento.

El procedimiento que sigue es similar al planteado para una estructura reticular, con las siguientes variables:

1. Se acepta que las masas de los estratos que constituyen la formación del suelo, se concentren en el punto medio de dicha formación de suelo.
2. La constante de resorte o rigidez al cortante de la masa de suelo estaría dada por la siguiente expresión:

$$K = F_f \times \frac{\mu A}{h}$$

siendo:

F_f = Factor de forma = 1,20 ó 0,80

μ = Módulo dinámico.

$D = h$ = Espesor del estrato.

A = Sección de la columna de suelo considerada.

3. La masa del estrato se obtendrá con la siguiente fórmula:

$$M = \frac{P_v h}{g}$$

en donde:

$\gamma = P_v$ = Peso volumétrico.

h = Espesor del estrato.

g = Aceleración de la gravedad.

4. De nuevo señalaremos que las características mecánicas de los estratos se conservan aproximadamente constantes pudiendo así prescindir del confinamiento que pudiera producir otros estratos vecinos, de características diferentes.

Todo el planteamiento matemático se apoya en el conocido teorema de D'Alembert:

$$\left(F - \frac{W_i}{g} a_{it} \right) = 0$$

en donde:

W_i = Peso de cada concentración de masas.

a_{it} = Aceleración instantánea de cada masa.

En consecuencia, el análisis se realiza siguiendo cualquiera de los métodos numéricos existentes, es decir para el primer modo de vibración como el método de Stodola, Vianello, Newmark y para los otros modos de vibrar el método de Holzer.

Teniendo en cuenta la teoría planteada se procedió a calcular los modos de vibración del suelo para cada uno de los perfiles estratigráficos de los sectores en análisis.

En la tabla 4.7., se muestra el cálculo de los modos de vibración para el sector del Estadio Libertad.

**CÁLCULO DE LOS MODOS DE VIBRACIÓN DEL SUELO
SECTOR ESTADIO LIBERTAD**

| ESTRATO | Clasificación U.S.C | Hi(m) | Nspt(gol-pie) | Vs(m/seg) | γ (t/m ³) | ρ (k-seg ²)/m ⁴ | μ -G(t/m ²) | Vs*Hi |
|---------|---------------------|------------|---------------|-----------|------------------------------|---|-----------------------------|------------|
| 1 | OL | 5.00 | 6 | 303.64 | 1.68 | 0.171 | 15779.73 | 1518.20 |
| 2 | SM | 8.00 | 7 | 194.09 | 1.61 | 0.165 | 6197.85 | 1552.72 |
| 3 | SM | 0.75 | 40 | 321.75 | 1.61 | 0.165 | 17032.23 | 241.31 |
| | | Σ = | | | | | | Σ = |
| | | 13.75 | | | | | | 3312.23 |

| Vsi=Vs*Hi/ Σ Hi (m/seg) | Ts=4* Σ Hi/Vsi (seg) | |
|-----------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| 240.89 | 0.23 | Primer modo de vibración. |
| | 0.076 | Segundo modo de vibración. |
| | 0.046 | Tercer modo de vibración. |

Tabla 4.7. Cálculo del periodo del suelo con el método de las velocidades de corte para el perfil sector Estadio Libertad.
Fuente: Ingeniería de Suelos y Cimentaciones Limitada

En la tabla 4.8. se muestra un resumen de los resultados obtenidos para los sectores en estudio, presentando los tres primeros modos de vibración de cada uno de los perfiles estratigráficos, además de la frecuencia para el primer modo de vibración.

| No. | LUGAR | PERIODO DE RESONANCIA (Seg) | | | FRECUENCIA (Hz) |
|-----|--|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | | 1 ^{er} modo de vibración | 2 ^{do} modo de vibración | 3 ^{er} modo de vibración | 1 ^{er} modo de vibración |
| 1 | ESTADIO LIBERTAD | 0.23 | 0.08 | 0.05 | 4.38 |
| 2 | HOSPITAL DEPARTAMENTAL | 0.15 | 0.05 | 0.03 | 6.54 |
| 3 | BARRIO LA PAZ | 0.07 | 0.02 | 0.01 | 13.93 |
| 4 | BARRIO PANDIACO | 0.22 | 0.07 | 0.04 | 4.46 |
| 5 | PARQUE INFANTIL | 0.08 | 0.03 | 0.02 | 12.77 |
| 6 | PLAZA DEL CARNAVAL | 0.13 | 0.04 | 0.03 | 7.77 |
| 7 | SECTOR POTRERILLO | 0.15 | 0.05 | 0.03 | 6.77 |
| 8 | SECTOR DOS PUENTES (INSTITUTO PEDAGÓGICO) | 0.08 | 0.03 | 0.02 | 12.33 |
| 9 | BARRIO EL TEJAR | 0.06 | 0.02 | 0.01 | 16.94 |
| 10 | UNIVERSIDAD DE NARIÑO - FACULTAD DE INGENIERÍA | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 19.90 |
| 11 | SECTOR TORRES VALLE DE ATRIZ | 0.20 | 0.07 | 0.04 | 5.01 |
| 12 | SECTOR AQUINES | 0.12 | 0.04 | 0.02 | 8.53 |
| 13 | SECTOR NUEVA ARANDA | 0.08 | 0.03 | 0.02 | 11.80 |
| 14 | COLEGIO BETHLEMITAS | 0.07 | 0.02 | 0.01 | 14.61 |
| 15 | COLEGIO LIBERTAD | 0.06 | 0.02 | 0.01 | 15.91 |
| 16 | COLEGIO SAN FRANCISCO JAVIER - PRIMARIA | 0.13 | 0.04 | 0.03 | 7.62 |
| 17 | EMPOPASTO - PLANTA CENTENARIO | 0.16 | 0.05 | 0.03 | 6.11 |
| 18 | EMPOPASTO - PLANTA AVENIDA MIJITAYO | 0.15 | 0.05 | 0.03 | 6.74 |
| 19 | INSTITUCIÓN EDUCATIVA MUNICIPAL - INEM | 0.08 | 0.03 | 0.02 | 12.83 |
| 20 | SECTOR MORASURCO | 0.13 | 0.04 | 0.03 | 7.78 |
| 21 | SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE - SENA | 0.10 | 0.03 | 0.02 | 10.25 |
| 22 | UNIVERSIDAD DE NARIÑO - FACULTAD DE ARTES | 0.10 | 0.03 | 0.02 | 10.37 |
| 23 | SECTOR NUEVO JAVERIANO | 0.07 | 0.02 | 0.01 | 15.21 |

Fuente: Cálculo del periodo del suelo, con el método de las velocidades de corte. ZEEVAERT Pags. 96 y 97
Dinámica de Suelos y Estructuras - Colindres - Limusa

Tabla 4.8. Resumen resultados obtenidos con el método de las velocidades de corte para los 23 sitios en estudio.

5 MICROTREPIDACIONES: APROXIMACIÓN AL ESTADO DEL ARTE

5.1 INTRODUCCIÓN

Las microtrepidaciones han sido estudiadas desde principio del siglo pasado. Omori (1908) fue el primero al realizar estudios empleando un péndulo inclinado (en Udías & Mezcuca, 1996), y concluyendo que existían vibraciones naturales en el suelo, que no correspondían a vibraciones sísmicas o pulsaciones oscilatorias, las cuales podían ser causadas por viento, ondas o perturbaciones artificiales como el tráfico y maquinaria (en Meneses, 1991).

A raíz del sismo del 18 de mayo de 1940 en California, EEUU, se empezaron a desarrollar estudios dinámicos del suelo que incluyeron la observación de las microtrepidaciones (Meneses, 1991).

Es así como a partir de 1950 aparecen investigaciones y metodologías lideradas por los japoneses sobre la utilización de las microtrepidaciones para el estudio de las propiedades dinámicas del suelo. La primera metodología de análisis fue propuesta en 194 por Kanai (1954). Posteriormente Aki (1957) y Kagami *et al* (1982) entre otros, han realizado investigaciones alrededor de la naturaleza de las microtrepidaciones y han desarrollado o mejorado metodologías para su uso. Recientemente Nakamura (1989) y Konno (1996) han propuesto metodologías novedosas y realizado diversos ensayos de campo para su evaluación. La metodología de Nakamura se ha difundido ampliamente en todo el mundo y ha sido aplicada como parte de muchos estudios de microzonificación sísmica, por dos razones, a saber: no requiere de mayores inversiones ya que solo utiliza una estación, y no requiere la generación artificial de ondas o la espera de sismos.

Este capítulo, que corresponde a una revisión bibliográfica sobre las microtrepidaciones, busca documentar el estado del arte en términos de la naturaleza, metodologías de análisis y resultados de aplicación. No pretende de ninguna manera entrar en discusiones teóricas sobre la naturaleza de las microtrepidaciones, ni sobre los métodos de análisis, pero si busca hacer una evaluación crítica de los resultados obtenidos por otros autores, con el fin de identificar la metodología más apropiada para el proyecto.

5.2 DEFINICIÓN

Según Lay & Wallace (1995) las fuentes primarias de ondas sísmicas han sido clasificadas en tres tipos: internas, externas y mixtas. Las fuentes más comunes, que involucran procesos de interés relacionados con las ciencias de la tierra, se muestran en la tabla 5.1:

| INTERNAS | EXTERNAS | MIXTAS |
|--------------------------------|---|-----------------------|
| Fallas sísmicas | Vientos, presión atmosférica | Erupciones volcánicas |
| Explosiones internas | Oleaje y mareas | Deslizamientos |
| Flujo hidrológico | Ruido cultural (tráfico, trenes) | Avalanchas |
| Movimientos del magma | Impacto de meteoritos | |
| Explotación minera subterránea | Explotación minera superficial Lanzamiento de cohetes Aterrizaje y descolaje de aviones | |

Con modificaciones a partir de Lay & Wallace (1995)

Tabla 5.1. Fuentes primarias de ondas sísmicas.

La diversidad de fuentes mostradas en la tabla anterior, sugiere que tanto los depósitos de suelos como las rocas están sujetos permanentemente a vibraciones.

Dichas vibraciones pueden clasificarse en:

- Naturales: Inducidas por cambios de presión atmosférica, tormentas, oleaje.
- Artificiales: Generadas por plantas de energía, voladuras en canteras, tráfico automotor, trenes, entre otras.

Las primeras de periodos relativamente largos, entre 2 y 3 segundos, son conocidas como microsismos, mientras que las segundas que generan ondas de periodo corto han sido llamadas microtrepidaciones (Nakamura, 1989).

En este sentido las vibraciones aleatorias inducidas a las masas de suelo y roca son conocidas como microtrepidaciones. Éstas fueron definidas por Lermo y Chávez-García (1994) como ambientes sísmicos ruidosos. Kanai y Tanaka (1961) las definieron como vibraciones de suelos con amplitudes entre 0,1 y 1 micrones y con periodos entre 0,05 y 2 segundos, causados por eventos artificiales como el tráfico, maquinaria industrial y otros.

El término microtrepidaciones corresponde a una traducción del inglés de *microtremor* pero también son conocidas como vibraciones ambientales; algunos autores usan el término microtemblores. En este trabajo se utilizará el término de microtrepidaciones.

5.3 NATURALEZA DE LAS MICROTREPIDACIONES

La naturaleza de las microtrepidaciones ha sido objeto de algunas investigaciones teóricas – no tantas como investigaciones aplicadas – que han incluido el desarrollo de diversas mediciones de campo para investigar los tipos de ondas que las componen y simulaciones numéricas de propagación del ruido en modelos geológicos simplificados. Aún no hay un consenso al respecto, se ha considerado que las microtrepidaciones están compuestas por ondas internas y ondas superficiales; o que están compuestas principalmente por ondas de superficie dispersas; o que están compuestas por ondas Rayleigh.

Aki (1957) analizó las microtrepidaciones estadísticamente en el espacio y en el tiempo como ondas estocásticas estacionarias y las consideró como ondas de superficie dispersas. Akamatsu (1961) y Nogoshi e Igarashi (1970, 1971) también consideraron que las microtrepidaciones se componen principalmente de ondas superficiales.

Kanai y Tanaka (1961) consideraron que las amplificaciones de las microtrepidaciones en capas del subsuelo se deben a múltiples reflexiones de ondas S incidentes verticalmente, en forma similar a los movimientos fuertes.

Después de detallados estudios de microsismos Allam (1967) concluyó que las microtrepidaciones podrían ser explicadas como ondas Love y Rayleigh en los sitios donde las interfaces entre los estratos del suelo están claramente definidas.

Udwadia y Trifunac (1973) mostraron la existencia del movimiento vertical en las microtrepidaciones que puede ser explicado por la multireflexión de las ondas SH en las capas del subsuelo. Sin embargo Udwadia y Trifunac (1974) mostraron la posible aplicabilidad de las microtrepidaciones en un área donde se encuentre resonancia fuerte durante movimientos sísmicos (según Giraldo *et al*, 1999).

Con base en mediciones de campo y análisis de dispersión de velocidades Horike (1985) postuló que las microtrepidaciones verticales consisten de ondas Rayleigh.

Nakamura (1989, 2000), basado en que las fuentes artificiales de vibración tienen principalmente movimiento vertical, consideró que las microtrepidaciones están compuestas por diferentes tipos de ondas que incluye tanto ondas de superficie como ondas internas, y que el efecto de las ondas Rayleigh aparece en las componentes horizontales (H) y verticales (V) de las microtrepidaciones, pero más acentuado en la componente vertical. Esto fue confirmado por simulaciones numéricas de Lermo & Chavez-Garcia (1994) y Lachet & Bard (1994) que establecieron que las microtrepidaciones consisten de ondas Rayleigh propagándose en un semiespacio de una sola capa.

Por su parte las simulaciones realizadas por Wakamatsu & Yasui (1995) encontraron que las microtrepidaciones predominaban las ondas Rayleigh y Love.

Thosinawa *et al* (1994) anotaron que los problemas entre la teoría y la práctica en relación con el estudio de las microtrepidaciones se debe a que las ondas inducidas provienen de muchas clases de fuentes desconocidas.

Ohmachi & Umezono (1998) encontraron que la proporción de ondas Rayleigh en las microtrepidaciones varía entre el 10 y el 90% entre diferentes lugares según la hora del día, y que la proporción más frecuente es 40%. Según esto determinaron que el análisis de microtrepidaciones debe incluir, adicionalmente, un estudio del porcentaje de ondas R al momento de medición.

5.4 METODOLOGÍAS PARA LA MEDICIÓN DEL EFECTO DE SITIO

La primera metodología propuesta para el estudio y uso de las microtrepidaciones fue la de Kanai y Tanaka en 1954 y posteriormente la de Aki (1957). Estas metodologías y otras posteriores contemplaban la lectura sobre el papel de los periodos de las ondas registradas y el uso de los ábacos. Estas metodologías son descritas más adelante.

Recientemente se han desarrollado, aplicado y probado metodologías para el análisis de las microtrepidaciones que buscan la determinación de parámetros dinámicos de los suelos; entre los más investigados están el periodo fundamental del suelo y su factor de amplificación, y otros menos explorados han sido la profundidad a basamento rocoso y las velocidades de la onda S.

Estas metodologías se pueden clasificar en tres según el número de estaciones de observación involucradas en el análisis: Método 1. Observación con arreglos de sensores y registro simultáneo. Método 2. Observación con una estación de referencia en roca. Método 3. Observaciones con una sola estación (usando una componente o tres componentes del movimiento). Las diferentes metodologías según estas tres categorías se describen en 5.4.2, 5.4.3, 5.4.4 respectivamente.

5.4.1 Antecedentes, metodología de Kanai y estudios posteriores. La metodología propuesta (Kanai & Tanaka, 1954) podía ser aplicada sin la necesidad de computadoras, y consistía de la construcción de curvas de distribución de periodos determinados según el método de *Zero crossing* a partir de registros de vibraciones ambientales tomados con un sensor horizontal:

Zero crossing: Para determinar periodos directamente de los registros medidos. Se mide la duración entre dos puntos adyacentes que cruzan la línea cero, ya que esa cantidad medida corresponde a la mitad del periodo, luego se multiplica por un factor de 2.

Curva de distribución: Con base en los periodos obtenidos por el método de *Zero crossing*, se elabora un histograma del número de ocurrencias para cada intervalo de valores de periodo.

A partir de la curva de distribución Kanai & Tanaka (1954) propusieron dos métodos para clasificar los suelos con el empleo de dos ábacos: uno donde se relacionan los periodos promedio con los periodos mayores en segundos y el otro, que relaciona periodo predominante, en segundos, con las amplitudes mayores, en micrones. Ambos permitían clasificar los suelos en 4 categorías según la tabla 5.2:

| Tipo de suelo | Descripción |
|----------------------|--|
| I | Roca, grava arenosa dura, suelos duros del terciario o más antiguos |
| II | Grava arenosa, arcilla dura arenosa, suelo diluvial o aluvial gravoso con espesor de 5 m o más |
| III | Suelo aluvial con espesor de 5 m o más |
| IV | Suelo aluvial de depósitos blandos, lodo o semejante con profundidad de 30 metros o más, terrenos recuperados de pantanos etc. |

Tabla 5.2. Clasificación de los suelos según la metodología de Kanai (1954)

Kanai y Tanaka (1961) compararon los resultados de periodos predominantes a partir del registro de microtrepidaciones y movimiento sísmico fuerte, concluyendo que el periodo predominante de un movimiento sísmico está bastante relacionado con el periodo más frecuente de las microtrepidaciones, y que también en los lugares en los que la curva de distribución de las microtrepidaciones tiene un solo pico, dicho periodo coincide claramente con el periodo predominante de los movimientos sísmicos. Por otro lado, si se

presentan más de dos picos, éstos son identificados por la curva de distribución de las microtrepidaciones (según Giraldo *et al*, 1999).

Kanai y Tanaka (1961) llevaron a cabo observaciones simultáneas de microtrepidaciones a diferentes profundidades en perforaciones en varios tipos de suelos y concluyeron que:

- La distribución de periodos varia con la profundidad
- La variación de la distribución de amplitudes con la profundidad no es simple ni formulable,
- El registro de microtrepidaciones en superficie permite obtener el periodo de resonancia que se obtiene con el sismo.

Las condiciones mínimas para que se presente una vibración predominante del terreno establecidas por Kanai (1957) se enuncian a continuación:

1. Cuando el suelo está formado por un solo estrato la respuesta espectral del suelo tiene un solo pico predominante;
2. En el caso de capas múltiples estratificadas la respuesta espectral de las amplitudes en superficie es muy irregular y el valor del pico no es tan grande como en el caso de un único estrato.
3. En algunas circunstancias particulares, cuando todas las ondas reflejadas en cada interface que arriban a la superficie libre están en la misma fase, la amplitud superficial crece a un valor extremadamente alto.
4. Es probable que amplitudes de vibración muy grandes aparezcan en superficie, aún si un medio rígido existe en el estrato superficial o en uno intermedio.
5. En muchos casos, el periodo predominante de vibración coincide con el periodo natural del estrato más alto.
6. La discriminación de un buen o mal suelo desde el punto de vista vibracional, a veces difiere de aquel considerado estáticamente, es decir, considerando solo la capacidad portante del suelo (en Meneses, 1991).

Estudios posteriores de Kanai y Tanaka (1961) indicaron:

1. La amplitud de los registros de microtrepidaciones obtenidas durante el día eran entre 2 y 10 veces más grandes que aquellas obtenidas durante la noche, lo que muestra que las amplitudes de las microtrepidaciones son fuertemente dependientes de las fuentes de vibración artificial alrededor del punto de medición.
2. Los periodos no varían sustancialmente con el tiempo y dependen mayormente de las propiedades dinámicas del suelo (en Meneses, 1991).

Adicionalmente Kanai y Tanaka (1961) efectuaron mediciones de las microtrepidaciones en superficie y a diferentes profundidades, encontrando que la relación de las curvas de distribución de periodos obtenidas en la superficie del terreno y a diversas profundidades mantenía los rangos de periodos predominantes obtenidos en cada una las respectivas curvas por separado. Asimismo que la curva de relación de amplitudes estaba en buena concordancia con el espectro de amplificación teórico para dicho sitio, obtenido a partir de análisis del perfil de suelo (en Meneses, 1991).

5.4.2 Método 1: Observación con arreglos de sensores. La observación de las microtrepidaciones a través de arreglos – *arrays* – de geófonos ha sido desarrollada para conocer la estructura del subsuelo y la naturaleza de la propagación de las microtrepidaciones. Los trabajos pioneros fueron los de Aki (1957), Toksoz (1964) y Lacoss *et al* (1969).

Esta metodología consiste en la instalación de varios sensores tanto en depósitos como en roca, lo cual supone que en los análisis se pueden eliminar los efectos de fuente y trayectoria.

Horike (1985) realizó observaciones de microtrepidaciones usando un arreglo de sismómetros verticales y obtuvo la dispersión de la velocidad de fase por análisis frecuencia-número de onda. Con el método de la inversión generalizada determinó la estructura de las ondas S usando las dispersiones de la velocidad de fase postulando que las microtrepidaciones verticales consisten de ondas Rayleigh. De esta manera obtuvo modelos de la estructura en dos sitios coincidiendo bien con los obtenidos por otros parámetros geotécnicos medidos *in situ*. En su análisis usó el rango de las frecuencias entre 0,5 y 2,5 Hz y los modelos de estructura fueron determinados desde la superficie a profundidades de varios cientos de metros (en Giraldo *et al*, 1999).

Matsushima y Okada (1990) aplicaron un método similar para determinar la estructura profunda en el Valle de Hokkaido, Japón y obtuvieron una buena correlación con los datos de gravimetría. Esta técnica ha sido aplicada con microtrepidaciones de alta frecuencia en estructuras superficiales (Tokimatsu *et al*, 1994).

Horike (1993) resumió las ventajas de este método de la siguiente forma:

1. Se determina bien la velocidad de fase de ondas superficiales por el método frecuencia/número de onda, por una clara separación de las ondas internas.
2. Se determina bien un modelo de estructura profunda de velocidad de ondas S, mejor que con otros estudios geotécnicos convencionales.
3. Este método es aplicable igualmente en áreas urbanas donde otras mediciones geotécnicas son difíciles de llevar a cabo.
4. Se deben incluir consideraciones adicionales para aplicar este método a una estructura subterránea irregular.

Sin embargo, en el valle de Ciudad de México Kagawa *et al* (1996) utilizaron arreglos de 7 sensores de velocidad (de 2 y 7 s de periodo) y sistemas de registro simultáneo, en tres sitios diferentes para la estimación de la profundidad y estructura de los sedimentos (velocidad de onda S). Diferentes dispersiones fueron obtenidas para los tres sitios y se encontraron claras características de la dispersión de las ondas R, las que fueron usadas para determinar la profundidad de la estructura sedimentaria.

Los resultados obtenidos aplicando esta técnica fueron contradictorios con la geología existente: un sitio donde los datos de anomalía gravimétrica y perforaciones lo definen como una estructura sedimentaria profunda fue clasificado como zona montañosa; un sitio considerado como zona lagunar fue clasificado como conformado por capas sedimentarias suaves y delgadas y, por último, un sitio conocido por sus condiciones rocosas, fue clasificado como una zona montañosa.

5.4.3 Método 2: Relación espectral con un sitio de referencia. De igual forma se hace con los movimientos fuertes y débiles, esta metodología busca compensar los efectos de fuente y trayectoria. Esta comparación supone que las ondas sísmicas no sufren los efectos de amplificación en roca o que éstas pueden ser despreciables. Esta metodología requiere de un sitio de referencia óptimo en cercanías de la ciudad (o en cercanías del sitio de medición).

El procedimiento más común, introducido por Borchardt (1970), es dividir el espectro observado en el sitio en cuestión por el espectro en un sitio de referencia. Si los dos sitios tienen efectos similares de fuente y trayectoria y, en el sitio de referencia hay una respuesta de sitio despreciable, el cociente espectral resultante corresponde a una estimación del efecto de sitio. Como Aki (1988) indicó, no es fácil compensar el factor de la fuente, porque en un área urbana las fuentes de microtrepidaciones de alta frecuencia (> 1 Hz) generalmente están distribuidas por todas partes. En cambio las fuentes de microtrepidaciones de baja frecuencia (< 1 Hz) de microtrepidaciones – o microsismos – han sido interpretadas como olas oceánicas y tienen menor variabilidad espacial.

Ota et al (1978) encontraron que los cambios sistemáticos de frecuencia del pico están asociados con el espesor de la roca firme. En cambio Kagami et al (1982) no encontraron frecuencias dominantes claras pero sí importantes correlaciones entre las amplitudes espectrales y el espesor de valles sedimentarios. El método de la relación espectral fue aplicado con éxito en Flushing Meadows, Nueva York, por Field et al (1990) y en el área de Bahía de San Francisco por Akamatsu et al (1991), Dravinski et al (1991) y Seo et al (1991). Seo (1992) y Gutierrez & Singh (1992) encontraron diferencias entre las amplitudes espectrales calculadas a partir de registros de movimiento fuerte y microtrepidaciones.

Una explicación gráfica de esta metodología se puede observar en la figura 5.1.

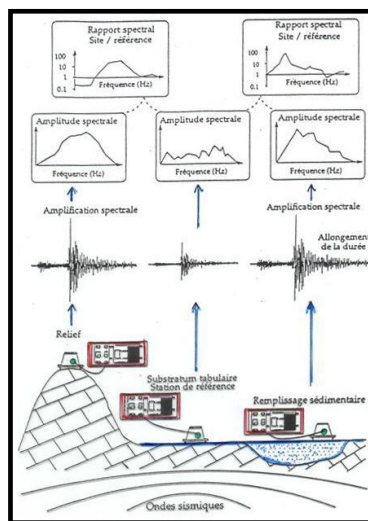


Figura 5.1. Relación espectral con un sitio de referencia.

5.4.4 Método 3: Observaciones con un solo sensor (1 ó 3 componentes). En términos de costos este es el más barato de los tres métodos, no sólo por que sólo usa un sensor (de tres componentes), sino por que no requiere un sitio de referencia, que a

veces puede no existir en cercanías de entornos urbanos sobre llanuras sedimentarias (p. ej. New Madrid, Field & Jacob, (1995); y área de Yun-Chia-Nan, Huang & Wu (1998)). Este es el caso de ciudades como Palmira y Candelaria en el Valle del Cauca.

Nakamura (1989) introdujo una metodología novedosa basada en que la relación espectral entre las componentes horizontales y la vertical, registradas en un mismo sitio, podían considerarse como la función de transferencia del suelo. Como se verá más adelante, esta función de transferencia está relacionada con la función de transferencia de las ondas superficiales horizontales (SH). Konno (1996) y Ohmachi & Umezono (1998) con base en la argumentación teórica sobre la naturaleza de las microtrepidaciones han presentado una modificación a la metodología de Nakamura, basados en argumentación teórica sobre la influencia de las ondas R en las microtrepidaciones y, en especial, en el cociente espectral H/V. Por su parte Arai & Tokimatsu (1998) han considerado que las microtrepidaciones se componen tanto de ondas R como L, por lo que propusieron una relación espectral diferente a la de Nakamura.

Tokeshi *et al* (1996) propusieron una metodología que usa las componentes horizontales de las microtrepidaciones. Proponen que en las curvas de espectros de fase (de las dos componentes horizontales de un lado del autocorrelograma), el punto de intersección donde la frecuencia más baja (de la curva) cruza el eje de las frecuencias (abscisas) puede ser usado para estimar la frecuencia fundamental de resonancia de las ondas SH. Sus resultados muestran una coincidencia con la frecuencia fundamental de resonancia de las ondas SH.

La metodología de Nakamura es descrita en detalle en el siguiente numeral debido a que ha sido la más aplicada actualmente en el mundo; ha sido objeto de numerosas investigaciones y por ende seleccionada en este proyecto. De igual manera, como ha ocurrido con otros métodos empíricos que encuentran acogida por alguna razón (alguna ventaja), la metodología de Nakamura se ha difundido ampliamente por lo que se ha ido “madurando” con el tiempo a través del uso y examen de muchos otros. Adicionalmente la metodología de Konno (1996) es descrita más adelante.

5.5 METODOLOGÍA DE NAKAMURA

5.5.1 Descripción ¹⁷. La metodología de Nakamura (1989) está basada en la suposición que el cociente espectral entre las componentes horizontal y vertical de las microtrepidaciones es una aproximación de la función de transferencia de los suelos. Para llegar a esto Nakamura se basó a su vez en las siguientes suposiciones:

1. Las microtrepidaciones se propagan principalmente como trenes de onda Rayleigh.
2. El efecto de las ondas Rayleigh es igual para las componentes horizontales y verticales en superficie.
3. El ruido artificial se propaga principalmente como ondas Rayleigh.
4. Las componentes horizontal y vertical de las microtrepidaciones (en su origen) se consideran similares.

¹⁷ ROSALES CLIMENT, Cristina. Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia. Cali, 2001, 275 p. Trabajo de grado (Ingeniera Civil). Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática.

5. Estas microtrepidaciones son amplificadas por las capas superficiales blandas del suelo acumuladas sobre un subestrato duro.
6. Se puede considerar que la componente horizontal de las microtrepidaciones es amplificadas por la multireflexión de la onda P.
7. La componente vertical de las microtrepidaciones no es amplificadas por las capas horizontales.

La metodología propuesta buscó básicamente eliminar el efecto de las ondas Rayleigh para describir la función de transferencia en función de las ondas internas.

Usualmente la función de transferencia S_T de las capas superficiales ha sido definida como la relación entre el espectro horizontal de las microtrepidaciones en superficie S_{HS} y en el subestrato S_{HB} así:

$$S_T = S_{HS} / S_{HB}$$

Como S_{HS} es afectado por las ondas superficiales, y como las ondas de las microtrepidaciones se propagan principalmente como ondas Rayleigh, S_{HS} podría estar afectado por este tipo de ondas. De tal manera que el efecto de las ondas Rayleigh debería ser incluido en la componente vertical de las microtrepidaciones en superficie pero no en la componente vertical en basamento. Asumiendo que la componente vertical de las microtrepidaciones no es amplificadas por las capas superficiales, se puede definir el efecto de las ondas Rayleigh (E_S) en esta componente así:

$$E_S = E_{VS} / E_{VB}$$

De modo que si no hay ondas Rayleigh $E_S = 1$ y, será más grande si el efecto de las ondas R se incrementa.

Asumiendo que el efecto de las ondas R es igual para las tres componentes (horizontales y verticales) en basamento, entonces $S_{TT} = S_T / E_S$, obteniendo que:

$$S_{TT} = S_T / E_S = R_S / R_B$$

Donde $R_S = S_{HS} / S_{VS}$ y $R_B = S_{HB} / S_{VB}$.

R_S y R_B , fueron obtenidos al dividir los espectros horizontales entre los verticales en superficie (R_S) y basamento (R_B). Según mediciones realizadas por Nakamura en basamento, la relación R_B es aproximadamente 1 para un amplio rango de frecuencias

en sitios donde existe un sustrato firme. Es decir, por lo que la propagación es aproximadamente igual en todas las direcciones, se puede concluir que:

$$S_{TT} \approx R_S$$

Esto significa que la función de transferencia de capas superficiales puede ser estimada solamente con las microtrepidaciones en superficie. En otras palabras, la componente vertical del movimiento de microtrepidaciones mantiene las características de la componente horizontal en basamento.

R_B , debe estar libre del efecto de ondas Rayleigh y tener características relativas al sitio, por lo que una estimación más confiable de la relación S_{TT} se produciría al multiplicarla por $1/R_B$ como término de compensación si existe información de las microtrepidaciones en basamento. La metodología con base en el cociente espectral H/V es llamado por Nakamura (2000) como Técnica QTS, Quasi Transfer Spectrum.

5.5.2 Resultados de Nakamura. Nakamura (1989) realizó mediciones continuas de las microtrepidaciones por más de 30 horas. Los sitios de registro estaban ubicados en subestaciones del tren Kanomomiya y Tabata. Para entender las características dinámicas de la estructura del suelo se hicieron mediciones en superficie y en el fondo de la estructura del suelo. Se utilizó un sensor de velocidad de periodo de un (1) seg.

Los resultados de comparación en los dos sitios, entre S_{TT} y R_S mostraron que:

1. En Kamonomiya S_{TT} y R_S coinciden tanto en el pico predominante como en la forma entera de las relaciones espectrales.
2. En Tabata S_{TT} y R_S mostraron ser casi similares.
3. La función de transferencia R_S no es afectada por las vibraciones inducidas por la operación de los trenes.
4. La amplificación máxima de la velocidad puede ser estimada de manera aproximada usando la máxima amplitud de R_S .

Adicionalmente se aplicó la relación R_S a registros de sismos fuertes en roca y en suelos en la Ciudad de México (Nakamura, 1989), encontrando que R_S también puede ser aplicada usando señales de los sismos.

5.5.3 Fundamentos de la técnica del cociente espectral H/V. Según Nakamura (1989), ratificado en Nakamura (2000), la relación espectral H/V de las microtrepidaciones está controlada por las ondas SH y no incluye los efectos de las ondas R presentes en las microtrepidaciones.

Pero algunas investigaciones teóricas y numéricas han indicado que la relación espectral H/V está controlada por la curva de polarización de las ondas R (Lachet & Bard, 1994; Lermo y Chavez-García, 1994; Konno, 1996). Nakamura (1989) dice que justamente la relación espectral H/V fue formulada para remover el efecto de las ondas R.

5.5.4 Aplicaciones y estudios técnicos y numéricos. La metodología de Nakamura (1989) ha sido cuestionada por algunos investigadores que no han llegado a resultados exitosos; otros no la encuentran factible porque consideran que tiene vacíos teóricos,

mientras que otros – la gran mayoría – han tenido resultados exitosos, según comparación con resultados a partir de análisis teóricos y de registros de movimientos fuertes. Otros autores consideran que la metodología solo es aplicable para limitadas condiciones geológicas, aquellas en las cuales las capas de sedimentos son planas, o cuando se está alejado de posibles efectos topográficos; y mientras que unos han encontrado que es aplicable en los extremos de cuencas sedimentarias, otros consideran que es aplicable en los centros de éstas.

La metodología de Nakamura ha sido objeto de múltiples investigaciones teóricas, aplicadas y de simulaciones numéricas. Sus resultados han sido comparados con los de otras técnicas de estimación de parámetros del efecto de sitio, por ejemplo aquellos basados en el registro de movimiento sísmico fuerte, y ha sido utilizada como parte de múltiples microzonificaciones alrededor del mundo.

Estos estudios y aplicaciones muestran que la metodología permite diferenciar zonas en contextos urbanos según características geotécnicas, dinámicas y geológicas similares. Ha sido usada para la determinación de los periodos fundamentales de vibración, factor de amplificación de este periodo, estimación del espesor de sedimentos, y perfil de velocidades de la onda S. Adicionalmente ha servido para la realización preliminar de microzonificaciones sísmicas de manera rápida, para la realización de microzonificaciones cuantitativas. Puede ser usada, para la selección de sitios para la localización de acelerógrafos.

A continuación se presentan una selección y síntesis de diversas investigaciones con base en el método de Nakamura.

Finn (1991) reportó que la técnica de Nakamura (1989) está basada en suposiciones débiles y que requiere comprobación de campo.

Otro estudio (Lermo y Chávez-García, 1994) comparó resultados de tres (3) técnicas, dos con una sola estación y la otra con una estación adicional de referencia. Las técnicas son:

1. Interpretación directa de la amplitud del espectro de Fourier o de la función de densidad espectral.
2. Cálculo de relaciones espectrales en suelo respecto a una estación en roca.
3. Técnica de Nakamura.

De aquí, se concluyó que hay una correlación significativa entre los resultados de la técnica de Nakamura y la función de transferencia teórica en una dimensión (1D), lo cual explica que diferentes investigadores han podido caracterizar exitosamente en 1D los efectos de sitio sin importar que fueran consideradas como ondas superficiales o de cuerpo y que los resultados teóricos soportan la idea que la técnica de Nakamura no es afectada por el tipo de fuente.

Se han realizado simulaciones numéricas para investigar la influencia de diversos parámetros en la relación espectral de Nakamura, y se compararon los resultados calculados a partir de modelos teóricos con aquellos de mediciones de campo. Lachet & Bard (1994) concluyeron que la relación espectral H/V obtenida a partir de la simulación del ruido muestra un pico cuya posición es independiente de la función de excitación de la fuente; que las relaciones espectrales H/V obtenidas de ondas SV incidiendo

oblicuamente muestran muchos picos cuya posición es independiente del ángulo de incidencia, y cuya frecuencia fundamental corresponde con la posición de la máxima amplitud, o amplitud pico, de H/V obtenida a partir de la simulación del ruido; que la forma de la relación H/V está fuertemente controlada por la curva de polarización de las ondas Rayleigh y que hay una gran correlación entre la posición del pico H/V derivada de la simulación del ruido con los obtenidos de las ondas verticales S.

Esto indica que la relación espectral H/V es una estimación confiable de la frecuencia de resonancia de una estructura de capas horizontales. En contraste, la amplitud del pico H/V no solamente mostró una sensibilidad alta a la velocidad, sino también a parámetros como la relación de *Poisson* de una estructura sedimentaria y a la distancia receptor-fuente. Su uso en la determinación de la amplificación del movimiento horizontal para ondas S incidente, parece aún prematuro desde un punto de vista teórico.

Finalmente anotaron que es importante considerar los límites de la aplicación el método de H/V en el caso de frecuencias de resonancias muy bajas que corresponden a estructuras sedimentarias muy gruesas ($f_0 < 0,5$ Hz), por lo cual plantearon la siguiente pregunta. ¿Son las fuentes superficiales como el ruido, capaces de excitar la estructura a bajas frecuencias?.

Por su parte Wakamatsu y Yasui (1995) usaron modelos de estructura simples, encontrando que en las microtrepidaciones simuladas predominan las ondas R y L, y que la función de transferencia tiene una buena correlación con la función de transferencia unidimensional de las ondas.

Con respecto a los factores de amplificación, Nakamura *et al* (1994) propusieron que si la relación espectral es menor que 1 sobre un área muy grande, podría corresponder a un área con potencial de licuación. A partir de la relación espectral H/V construyeron una ecuación para estimar el riesgo por licuación.

Según Kudo (1995) se puede decir que existen problemas menos significativos para encontrar la frecuencia resonante del modo fundamental en un sitio a partir de H/V, sin tener en cuenta el tipo de onda que componen las microtrepidaciones. (en Giraldo *et al*, 1999), sin embargo argumenta que la microtrepidaciones no puede ser expresadas como una convolución de ondas internas y superficiales sino que son generalmente una suma de ondas internas y superficiales, de ahí que el cociente de Nakamura no genera ninguna compensación de ondas Rayleigh (según suposición de Nakamura, 1989), y que la relación espectral H/V de las microtrepidaciones en basamento, que Nakamura (1989) asume aproximadamente igual a uno, es válida únicamente si en las microtrepidaciones predominaran las ondas Rayleigh y su elipticidad fuera casi unitaria.

Field & Jacob (1995) compararon los resultados de la clásica relación entre respuesta en roca y en sedimentos con tres técnicas de estimación de respuesta de sitio que no requieren estación de referencia. Los métodos de comparación fueron:

- Inversión de efectos por fuente y trayectoria
- Relación espectral H/V con registros de sismos
- Relación de Nakamura con registros de microtrepidaciones.

Las tres técnicas evaluadas, que no dependen de un sitio de referencia, revelaron información útil para la estimación de la respuesta de sitio en diferentes partes de East Bay (California), concluyendo que Nakamura fue exitosa para identificar la frecuencia fundamental de resonancia del suelo.

Alva *et al* (1996) y Huamán (1991) compararon los periodos predominantes obtenidos de mediciones de microtrepidaciones en superficie y el periodo predominante calculado a partir de análisis de amplificación dinámica a deformaciones pequeñas, encontrando una buena correspondencia entre dichos valores.

Otra investigación (Dravinski & Wen, 1996) comparó dos técnicas de estimación del movimiento del terreno: la relación entre sedimento y basamento de Kagami (1982, 1986) y la de Nakamura (1989). Ambos fueron analizados en cuencas sedimentarias profundas de dos formas (forma semi-circular) y tres dimensiones (semi-esférica). A su vez, fueron comparados con las frecuencias de resonancia teóricas; los resultados mostraron similitud para los dos tipos de cuencas: los valores teóricos coincidieron con los calculados con la metodología de Kagami para la frecuencia fundamental de resonancia, pero no para el segundo modo, mientras que el tercero no es reportado.

Por su parte, las estimaciones con el cociente espectral H/V en superficie (Nakamura 1989) mostraron que el método tiene capacidad para predecir mejor la frecuencia en los bordes de la cuenca, ya que hacia el centro del valle muestra un error del 7% con respecto a las estimaciones teóricas. Los modos superiores no son estimados bien con este método. Para la estimación de la amplificación el método de Nakamura no llegó a resultados exitosos.

Konno (1996), identificó inconsistencias en las suposiciones de Nakamura, consideró que las microtrepidaciones consisten principalmente de ondas superficiales y que el pico fundamental de las relaciones H/V está correlacionado con el modo fundamental de las ondas Rayleigh. A iguales resultados llegaron Lachet & Bard a partir de simulaciones numéricas. Así, con base en argumentación teórica, Konno (1996) propuso dos modificaciones a la metodología propuesta por Nakamura (1989):

1. Realizar un suavizado de los espectros H y V antes de calcular el cociente H/V, para lo cual propuso el uso de la ventana W_b (presentada más abajo).
2. No calcular la amplitud directamente del espectro obtenido de H/V, sino a partir de la fórmula $A_s = 2,5 \beta R_{MB}$, donde R_{MB} es la relación entre la componente horizontal de las ondas R y las componentes horizontales de las microtrepidaciones (ondas R y L).

$$W_b(f)_c = \left[\frac{\sin \left(b * \log_{10} \left(\frac{f}{f_c} \right) \right)}{b * \log_{10} \left(\frac{f}{f_c} \right)} \right]^4$$

W_b es la ventana propuesta, b es un coeficiente correspondiente con el ancho de banda, f es la frecuencia, f_c es la frecuencia central que da la simetría a la ventana en la escala logarítmica.

Este procedimiento fue aplicado en registros adquiridos en 23 sitios de Tokio, y después de representar el factor de amplificación en un mapa se comparó con el mapa de microzonificación existente, con resultados satisfactorios.

De manera similar Ohmachi y Umezono (1998) propusieron introducir en la relación espectral H/V el uso de un coeficiente que represente la proporción de ondas R presentes en las microtrepidaciones medidas.

Toshinawa *et al* (1997) encontró que los periodos predominantes de Nakamura coincidían con los de movimiento fuerte y por su parte Taber (1996) encontró que coincidían con los de movimiento débil. Ninguno encontró correspondencia entre las amplitudes. Taber (1996), Ibs-von Seth & Wohlenberg (1999) y Dravinski *et al* (1996) utilizaron los valores relativos de las amplitudes.

Sarria(1996), basado en que las microtrepidaciones corresponden a ondas de muy pequeña magnitud con bajos valores de energía, y en que los sismos de interés en la ingeniería sísmica corresponden a ondas de gran amplitud con altos valores de dicha energía, considera que :

- Los periodos de vibración del método de Nakamura deben resultar inferiores, más cortos, que los que se presentan dentro del mismo depósito de suelo cuando es sacudido por un sismo intenso que introduce grandes deformaciones angulares – entre más intenso el sacudimiento más largos los periodos de vibración, es decir, más baja la frecuencia natural dominante en el depósito.
- Los niveles de amplificación calculados a partir del registro de microtrepidaciones deben conducir a valores mayores que aquéllos que ocurren durante un sismo intenso.

Para una microzonificación cualitativa de Basilea Fah *et al* (1997) utilizaron el registro y estudio de las microtrepidaciones entre otras variables de carácter geológico y geotécnico como tipo, consolidación y variaciones laterales del espesor de los depósitos cuaternarios, profundidad del nivel freático, y velocidad de ondas S estimadas a partir de valores de SPT. Adicionalmente realizaron simulaciones numéricas del ruido para todos los sitios de medición de microtrepidaciones, según los modelos geológicos y geotécnicos previamente realizados, encontrando una buena correlación entre los resultados de simulaciones y los de las mediciones de ruido ambiental. Concluyeron además de la amplitud de la relación espectral entre las componentes H y V, en la frecuencia fundamental, es una medida del contraste de velocidades de onda S entre los sedimentos no consolidados y la roca o basamento.

Abeki *et al* (1998), según mediciones realizadas en Los Palos (Venezuela), encontraron que los periodos predominantes están relacionados con la profundidad de la estructura sedimentaria. Ibs-Von Seth & Wohlenberg (1999) desarrollaron una metodología de análisis de los datos de microtrepidaciones para estimar el espesor de las capas sedimentarias a basamento a partir de la frecuencia estimada de análisis e interpretación de registros de microtrepidaciones. Usaron dos metodologías, el cociente espectral con una estación en sedimentos y una en roca (cociente S/R), y el cociente espectral propuesto por Nakamura (H/V). Concluyeron que el registro de microtrepidaciones en conjunto con la metodología de Nakamura se convierte en una herramienta poderosa para estimar el espesor de las capas sedimentarias basados en los siguientes resultados:

1. Buena correlación entre las frecuencias calculadas por el cociente H/V para un rango amplio de profundidades entre 10 y 1000 metros.
2. Poca correlación de las frecuencias calculadas con el método del cociente S/R.
3. Se encontró una dependencia entre las profundidades a basamento (conocidas previamente) y los picos predominantes de los cocientes espectrales. Esta dependencia está claramente controlada por la curva de velocidad-profundidad de la onda S, observación que se relaciona con el modelo de resonancia de dos capas. En los sitios donde se conocía la profundidad a basamento, se estudió la influencia de fuentes locales de ruido, encontrando que mientras la técnica clásica (cociente S/R) es muy sensible, el cociente H/V (de Nakamura) permanece estable.

Aunque Alfaro (1997) considera que se pueden usar tanto sensores de aceleración como de velocidad para realizar las mediciones de microtrepidaciones, experimentos bajo condiciones controladas de Muccarelli (1998) mostraron grandes diferencias en los resultados obtenidos al comparar dos sensores de velocidad y uno de aceleración. Por su parte Lerno & Chávez-García (1994) consideran que el sensor de velocidad empleado debe tener una frecuencia menor que la del sitio a medir.

Diversos experimentos bajo condiciones controladas permitieron a Muccarelli (1998) llegar a las siguientes conclusiones:

- Usar sensores de velocidad (con un sistema de adquisición de alta ganancia evitando interferencia por cableado externo para prevenir de ruido mecánico o electrónico) en vez de sensores de aceleración, debido a que no proporcionan suficiente resolución para obtener información de las vibraciones ambientales en las tres componentes.
- En las mediciones sugiere tener especial cuidado con las condiciones climáticas; el viento debe ser evitado con apropiadas protecciones.
- La presencia del tráfico no altera los resultados.
- Se deben buscar sitios a campo abierto lo menos intervenidos posible para conseguir el mejor acoplamiento entre el sensor y el suelo (se recomienda en particular evitar hacer mediciones sobre cubiertas asfálticas).
- Energías inducidas al suelo (por ejemplo con un martillo de los usados para refracción sísmica) pueden ayudar a resolver mejor el comportamiento a bajas frecuencias.
- Las bases de edificios pueden ser buenos puntos de medición porque protegen de las condiciones climáticas y están acoplados con el terreno, sin embargo debido a la interacción suelo-estructura deben tomarse mediciones en los diferentes pisos para identificar las frecuencias inducidas por la vibración del edificio.

Riepl *et al* (1998) compararon 4 métodos para la estimación de respuesta de sitio en la cuenca de Volvi, en Grecia. Sus resultados muestran que las formas similares del espectro de respuesta estimado por el método de longitud de coda (Phillips & Aki, 1986) y por el de Nakamura (1989), ofrecen información importante acerca de las frecuencias significativas del sitio examinado, particularmente en el rango de las bajas frecuencias. Consideran probable que la geología superficial influya de igual manera las componentes vertical y horizontal del movimiento, y por lo tanto enmascare los niveles de amplificación al realizar el cociente espectral entre la componente horizontal (promediada) y la vertical.

Coutel & Mora (1998) también compararon otras técnicas de estimación de respuesta con la técnica de Nakamura:

1. La relación espectral sedimento a roca usando sismos.
2. La relación espectral de ruido sedimento a roca.
3. La relación de Nakamura.
4. La relación espectral de las componentes horizontal y vertical usando sismos.

Se tomó como “verdadera” la relación basamento a sedimento con datos de sismos, o SBSR. Los resultados muestran que la técnica de Nakamura, puede predecir el primer modo de resonancia con buena precisión en la mitad de la cuenca (el error varía del 100% en los bordes a 10% en la mitad de la cuenca) pero subestima el nivel de amplificación en un factor de 3. Concluyeron que la estimación del espectro de amplificación de sitio usando métodos de observación de campo no son confiables o pueden resultar incorrectos cuando una estructura de cuenca subsuperficial está presente.

Asumiendo que las microtrepidaciones están principalmente compuestas por ondas de superficie, Bard (1999) según Nakamura (2000) indica que varios investigadores están de acuerdo en dos argumentos:

1. La relación espectral H/V está relacionada básicamente con la elipticidad de las ondas R presentes en la componente vertical.
2. Esta elipticidad depende de la frecuencia y muestra un pico alrededor de la frecuencia fundamental en sitios con alta impedancia entre los suelos – superficiales – y las rocas que los suprayacen.

Giraldo *et al* (1999), como parte de los estudios de microzonificación de Barcelona, encontraron que las mediciones y resultados son independientes de la hora del día en que se realicen. Destacaron la importancia de la influencia del tratamiento de los registros en los resultados obtenidos: al comparar los mismos datos por el método de Nakamura (1989) y por el de Konno y Ohmachi (1998), se encontró que entre 0 y 0,5 segundos existe correlación mientras que para periodos mayores a 1,0 no la hay.

Se puede ver que múltiples investigadores han aplicado la metodología de Nakamura con resultados satisfactorios compartiendo la idea general que es una metodología con grandes capacidades para la estimación de periodos naturales de vibración (e.g. Field y Jacob, 1993; Ohmachi *et al*, 1994; Lermo y Chávez-García, 1994; Konno y Ohmachi, 1996; Field y Jacob, 1990; Hough *et al*, 1991; Lermo *et al*, 1992, 1994; Goula *et al*, 1997; Zaslavsky y Shapira, 1997; Triantafyllidis y Hatzidimitriou, 1997; LeBrun *et al* 1997; Giraldo *et al*, 1999; Coral, 2002;), y otros no han tenido éxito (Pitilakis, 1997; Ingeominas, 1997; Jaramillo, 2000).

Originalmente la metodología de Nakamura introducida para la evaluación del efecto de sitio con base en registros de microtrepidaciones ha sido extendida para registros de movimiento débil (Ohmachi *et al*, 1991; Field & Jacob, 1993; Field *et al*, 1995; Theodolius *et al* 1995; Riepl *et al*, 1998) y en algunos estudios para registros de movimiento fuerte (Lermo & Chávez-García, 1994; Theodolius & Bard, 1995; Suzuki *et al*, 1995).

Finalmente, en la estructura del proyecto de investigación europeo SESAME (Valoración de Efectos de Sitio Usando Las Excitaciones Ambientales), se presentan unas pautas para el uso de la técnica de la relación espectral H/V siendo el resultado de un comprensivo y detallado análisis realizado por los participantes del proyecto durante los años 2001 a 2004, anotando que en general, debido al carácter experimental del método de H/V, los valores absolutos obtenidos para un sitio dado requieren un examen cuidadoso, especialmente en la recolección y procesamiento de los datos debido a las múltiples opciones existentes para realizar cada proceso. Además se recomienda que antes de realizar una campaña de medida de vibraciones se realicen estudios geológicos locales, sobre todo en depósitos cuaternarios, reforzando así la interpretación de los resultados de H/V con información geológica, geofísica y geotécnica.

Los autores del proyecto concluyen que a pesar de las limitaciones de H/V, esta es una herramienta muy útil para microzonificaciones y estudios de respuesta de sitio, siendo esta técnica muy eficaz estimando la frecuencia natural de los sitios blandos de tierra cuando hay un contraste de impedancia grande con el lecho de roca subyacente, recomendando el método sobre todo en las áreas de sismicidad baja y moderada, debido a la falta de registros de terremotos significantes, como comparado a las áreas de sismicidad alta.

Las pautas del reporte final de este proyecto incluyen factores como: Parámetros magnetofónicos, instrumentación, influencia del sensor, condiciones experimentales, duración magnetofónica, dimensiones espaciales, acoplamiento *in situ* tierra – sensor, acoplamiento artificial tierra – sensor, posición del sensor, estructuras cercanas, condiciones climatológicas y perturbaciones, entre otras.

Ya que este es uno de los primeros proyectos de investigación desarrollados en los últimos años y debido a la gran cantidad de información registrada durante los tres años de duración del mismo, sus autores desarrollaron el software J-SESAME (2004), específicamente para aplicar la técnica de relación espectral H/V propuesta por Nakamura, teniendo en cuenta que este se mantenga como una herramienta de fácil aplicación de acuerdo a las especificaciones de análisis perfiladas en el reporte final del proyecto. Dicho software se tratará con más detalle en 5.5.7 y el capítulo 6.

5.5.5 Otras aplicaciones. En principio la relación espectral H/V propuesta por Nakamura (1989) ha sido utilizada para la determinación del periodo de vibración natural de los suelos y el factor de amplificación asociado, pero se han desarrollado otras aplicaciones, de dicha relación espectral, las cuales se lista a continuación.

1. Determinación de la profundidad a basamento (Nakamura, 2000) (Ibs-von Sat & Wohlenberg, 1999).
2. Determinación del potencial de licuación (Nakamura *et al*, 1994).
3. Verificación de comportamiento de sitio por eventos sísmicos destructivos (Toshinawa *et al*, 1997).
4. Determinación de los periodos de vibración de edificios (Muccarelli, 1998).

5.5.6 Equipos y procedimiento de medición. La metodología de Nakamura es muy simple y fácil de realizar. Requiere de un sensor que registre las tres componentes ortogonales del movimiento conectado con un sistema de adquisición simultáneo para 3 canales (1 para cada componente del movimiento). El sensor debe tener un periodo

natural de vibración y una sensibilidad que junto con la ganancia (alta) del sistema de adquisición permitan registrar las ondas de interés, de amplitudes del orden de 10^{-6} m/s, con periodos de vibraciones entre 0,1 y 10 Hz.

Aunque se han usado tanto sensores de velocidad como de aceleración, aún no hay un consenso sobre el cual sería el más adecuado. En principio uno que cumpla con los requisitos arriba expuestos sería suficiente, aunque Muccarelli (1998) adjudica el no éxito en la aplicación de la metodología de Nakamura al uso de acelerógrafos, éstos diseñados para el registro de movimiento fuerte. (Rosales, 2001)

En general los sensores de velocidad han sido los más usados para el estudio de las microtrepidaciones (Lermo y Chávez-García, (1994); Fah *et al* (1997); Ibs-von Seht & Wohlenberg, (1999); Kagawa *et al* (1996); Abeki *et al*, (1998); Nakamura (1998); Kanai, 1961; Stäl & Westberg (1996)).

También se han usado sensores de banda ancha cuando los depósitos en estudio son muy profundos (Ibs-von Seht & Wohlenberg, 1999; Abeki *et al* 1998).

Los sensores de aceleración han sido utilizados en combinación con sensores de velocidad como es el caso de Giraldo *et al* (1999). Otros han aprovechado las redes acelerográficas existentes para realizar mediciones en puntos fijos complementadas con puntos móviles (Ingeominas & Uniandes, 1997), donde los periodos calculados con relación de Nakamura, a partir de los registros de microtrepidaciones en acelerógrafos, no correlacionaron con aquellos obtenidos del análisis de los registros sísmicos de aceleración (Uniandes, 1997).

Para la medición de las microtrepidaciones sólo se requiere instalar el sensor de 3 componentes en un sitio de interés a cualquier hora del día y adquirir y grabar las microtrepidaciones por un lapso de tiempo.

Sitio. Las mediciones de microtrepidaciones son muy versátiles en cuanto se pueden realizar en muchos sitios de la ciudad. Los parques, los jardines, los separadores viales en pasto y las canchas de fútbol, que generalmente se encuentran distribuidos a lo largo y ancho de las ciudades, son los sitios ideales para realizar las mediciones. Algunos autores han realizado mediciones en las intersecciones de una cuadrícula de ancho variables entre 100 y 1000 metros de ancho (Abeki *et al*, 1998; Toshinawa *et al*, 1997) mientras que otros han realizado las mediciones según una distribución espacial controlada por los sitios aptos para realizar las mediciones (p. ej. Stal & Westberg, 1996). Con respecto al ruido cultural presente en cercanías del sitio de registro, Stal & Westberg (1996) consideran que hay tres factores a tener en cuenta:

1. No puede existir una frecuencia predominante en los registros asociado con el ruido cultural (ejemplo una planta de energía).
2. Es importante medir un espectro de frecuencias completo de tal manera que no haya ventanas en las frecuencias.
3. Si hay ventanas en las frecuencias el método no puede ser aplicado.

Las implicaciones de estos 3 factores enunciados se listan en la tabla 5.3.

Hora del día. Nakamura (1989) realizó mediciones continuas durante más de 30 horas ya que se propuso investigar la influencia del ruido cultural en las mediciones y encontró que las horas de la madrugada, entre la una y las cuatro, proporcionan las condiciones ideales para las mediciones. Recientemente diversos investigadores han realizado pruebas a diferentes horas del día encontrando que aunque la amplitud de las señales se incrementa en el día (un orden de magnitud con respecto a mediciones nocturnas) no hay variación significativa en la forma de los espectros (Muccarelli, 1998; Giraldo *et al*, 1999).

Por su parte Sommerville *et al* (1993), encontraron que la forma del espectro es la misma por debajo de 1 Hz. Algunos autores consideran inclusive que el ruido cultural puede ayudar a definir mejor el periodo fundamental de vibración del suelo, Stal & Westberg, 1996 indican que mediciones en cercanías de una vía con tráfico constante se traducirían en mejores resultados, y Muccarelli (1998) encontró que energizando el suelo con un martillo de refracción sísmica, se puede modelar mejor los periodos.

Lapso de tiempo. Con respecto al tiempo de registro de las señales aun no hay un consenso; Algunos autores han registrado las microtrepidaciones durante 10 minutos cada hora entre la una y las cuatro de la mañana (Fah *et al*, 1997); otros utilizaron registros de cinco minutos de duración para mediciones cada hora durante 24 horas y tres registros de 40 segundos para mediciones esporádicas (Toshinawa *et al*, 1994); mientras que otros consideran que se deben grabar cinco registros de un minuto (Muccarelli, 1998). Por su parte Ibs-von Seth & Wohlenberg (1999) utilizaron las secciones mas “silenciosas” de los registros de 10 minutos, obteniendo señales, para el análisis, con longitud variable entre 1 y 10 minutos.

| |
|--|
| 1. La superficie debe estar libre de asfalto o concreto. El instrumento debe estar en contacto con el terreno y debe ser colocado por debajo de la capa vegetal. |
| 2. No se deben realizar mediciones en cercanías de maquinaria que generen ondas en las bajas frecuencias. |
| 3. Evitar realizar mediciones en edificios altos, los vientos fuertes podrían hacer vibrar el edificio e inducir vibraciones en las bajas frecuencias en la cimentación del edificio. Estas vibraciones pueden afectar las mediciones. |
| 4. Si las mediciones se hacen cerca de vías, estas deben ser planas. Bombas de agua pueden crear ondas transitorias que se pueden mezclar en los registros de las microtrepidaciones. |
| 5. El tráfico en las vías debe ser lo más continuo posible. De tal manera que los registros no tendrán señales transitorias. En la ciudad hay muchas fuentes de vibración, las mediciones cerca de vías son las mejores ya que el tráfico es una fuente de ruido más poderosa. |
| 6. Cuando se mide en cercanías de vías transitadas, es mejor medir en un sitio cercano a una intersección, tal que las ondas provengan de diferentes direcciones. |
| 7. Se deben hacer mediciones lejos de tuberías y bombas de agua, las cuales pueden afectar las mediciones. Para evitar estas fuentes, sería bueno contar con mapas de infraestructura. |

Tabla 5.3. *Criterios para la selección de sitio de registro de microtrepidaciones según Stal & Westberg (1996)*

5.5.7 Procesamiento y análisis de las señales. El procesamiento básico de las señales corresponde al tratamiento que en general se aplica a señales, convertidas de analógicas a digitales – discretizadas – según periodos de tiempo, las cuales serán analizadas en el dominio de las frecuencias. La técnica más común de análisis espectral usada para el estudio de las microtrepidaciones es la transformada rápida de Fourier, conocida por sus siglas en inglés FFT. Algunos autores han usado también la función de la densidad espectral. El hecho de usar la FFT implica que se deben realizar unos procesamientos previos a las señales para poder aplicarla apropiadamente. A continuación se detallan los procesamientos generales que se realizan a las señales.

Corrección de la línea base. La amplitud de la señal que se toma en campo generalmente viene desplazada en una cantidad determinada debido a varios factores como alteraciones en el equipo, inestabilidad de la señal misma, entre otras.

La corrección por línea base consiste en determinar la cantidad que se debe correr cada ordenada para poder encontrar la línea real de cero. Para tales fines se debe calcular un polinomio que mejor se ajuste a los datos originales por el método de los mínimos cuadrados, este polinomio conforma una línea recta, de tal manera que los coeficientes del polinomio luego son restados de la señal original para obtener una función centrada en el origen.

Filtros. Se usan para filtrar frecuencias que no son del interés en relación con los modos de vibración dinámica de los suelos. Hay tres tipos de filtros básicos: pasabajas, pasaltas y pasabanda. Mientras que el primero detiene todas las señales por encima del valor del filtro pasabajas, el segundo, detiene todas las señales por debajo del valor del filtro pasaltas. El filtro pasabanda detiene las frecuencias que están fuera de un rango dado.

- En microtrepidaciones estos filtros se han aplicado cuando se han escogido frecuencias de adquisición mucho mayores que la frecuencia de interés. El filtro de pasabanda es uno de los más aplicados (p. ej. Muccarelli, 1998; Giraldo *et al*, 1999).

Efecto *aliasing*: Teorema de muestreo y Frecuencia de Nyquist. Este es un efecto asociado en general, al análisis espectral. En primer lugar el sistema de adquisición debe evitar el efecto *aliasing*, problema potencial en señales discretizadas. El teorema de muestreo dice que el muestreo con un periodo T tiene sentido solamente si la señal a ser discretizada no tiene energía importante en frecuencias, $F \geq 1/(2T)$. Esto significa que el rango de frecuencias útil es 0 a $F/2$ Hz, donde $F/2$ es conocida como la frecuencia Nyquist. (e.g. Martinelli, 1992). Se dice entonces, que el efecto de *aliasing* ocurre si la diferencia de las frecuencias cae dentro del rango de interés ($f < F/2$), lo que significa que cuando se realiza en análisis espectral, las frecuencias de interés – parte real -, se mezclan con las no interés – parte imaginaria -. (e. g. Stall & Westberg, 1996). Para evitar esto el sistema de adquisición de las microtrepidaciones – y en general de señales – debe tener un filtro “antialias”. Generalmente estos vienen incorporados en el sistema de adquisición.

Efecto *leaking* o truncado. Este es otro efecto asociado con el uso de la FFT. La transformada de Fourier supone que la señal analizada se repite de manera infinita en el tiempo, lo que implica que la señal incluirá siempre periodos completos. Ese no es el caso de las señales con duración finita, como las de las microtrepidaciones, de tal manera que cuando algún periodo queda truncado la suposición de FFT no es válida y eso afecta los

resultados. Este problema se soluciona al usar una ventana, que minimiza las amplitudes al inicio y al final de la señal. Algunas de las ventanas más conocidas son: Rectangular, Hamming, Hanning, Kaiser-Bessel, *Truncated gaussian* y *Flat top* (p.ej. Randall & Tech, 1987).

- La ventana de Hanning ha sido la más usada en los análisis de microtrepidaciones (p.ej. Giraldo *et al*, 1999; Stal & Westberg, 1996). Muccarelli (1998) usó la función coseno de 5%.

Suavizado del espectro. El suavizado permite obtener curvas más limpias, libres de frecuencias superpuestas a las frecuencias dominantes.

- Entre los más usados en microtrepidaciones se encuentran el triángulo de Pascal (Stal & Westberg), la campana de Gauss (Giraldo *et al*, 1999), la ventana de Parzen de 0,5 Hz (Toshinawa *et al*, 1994) y la ventana de tiempo del 10% del coseno escalonada (Riepl *et al* 1998).

Safak (1991) demostró la importancia del tratamiento de las señales anotando que los diversos procesamientos pueden influir en los resultados; a pesar que trabajo con registros de sismos fuertes, esta anotación debe ser tenida en cuenta en el tratamiento de las señales de microtrepidaciones.

5.6 DISCUSIÓN Y SÍNTESIS

Discusión. Las múltiples experiencias realizadas alrededor del mundo – algunas documentadas en el numeral 5.5.4 – que han usado las microtrepidaciones como fuente de ondas sísmicas en conjunto con la metodología de Nakamura (1989), y que han resultado o no exitosas, no son comparables completamente por las siguientes razones:

1. Han sido realizadas bajo diversas condiciones ambientales (aún no hay un estándar sobre requisitos de los sitios de medición);
2. Diferentes equipos de medición han sido empleados para el registro de las señales.
3. Han sido aplicados diferentes métodos de procesamiento (selección de filtros, ventanas y rutinas de análisis espectral).

Sobre la primera, Stal & Westberg (1996) y Muccarelli (1998) han indicado que existen una serie de factores a tener en cuenta durante el registro de las microtrepidaciones, entre ellas:

Con respecto al numeral 1, (a) La de realizar mediciones durante condiciones climáticas de calma, sin lluvia y sin vientos (el viento no se encuentra acoplado con los depósitos de suelo, de tal manera que puede afectar las mediciones de dos formas: generar movimientos adicionales en el suelo e inducir vibraciones directamente en el sensor); (b) Proteger el sensor con un balde o caja metálica durante las mediciones (esto minimiza por un lado el efecto del viento en el caso de que se presente y evita cualquier interferencia de cableado(mecánica o eléctrica)); (c) Realizarlas sobre el terreno abierto lo menos intervenido posible y alejado de estructuras (hidráulicas o edificios).

Sobre el segundo – equipos – se puede decir que aunque Muccarelli (1998) con base en experimentos con dos sensores de velocidad y uno de aceleración descarta el uso de

sensores de aceleración, y en su lugar sugiere el uso de sensores de velocidad. Alfaro (1997) considera que las mediciones se pueden realizar indistintamente con sensores de velocidad o de aceleración siempre y cuando los niveles de ruido ambiental tengan una amplitud mayor que el nivel de resolución del equipo, como es el caso de las grandes ciudades, condición soportada por Lermo & Chavez-García (1994).

La calidad y resolución de las señales de microtrepidaciones está controlada por los siguientes factores: periodo natural de vibración y sensibilidad del sensor, ganancia y resolución del sistema de adquisición. En principio un sensor y un sistema de adquisición que permitan registrar microtrepidaciones del suelo con frecuencias entre 0,05 y 10 Hz y con amplitudes del orden del 10^{-6} m/s sería suficiente.

Bermúdez *et al*, (2002), anotan en trabajos de investigación como “Estimación del T_0 en el área metropolitana de Bucaramanga”, que las microtrepidaciones mostraron resultados claros cuando se utilizó la técnica de Nakamura y que al comparar los resultados presentados en dicho estudio, con los obtenidos en otras ciudades del país, es fácil apreciar que la variación de periodos es muy baja, apreciando que los suelos presentan una tendencia a ser homogéneos, siendo estos estudios desarrollados con acelerómetros.

Otros trabajos de investigación desarrollados por INGEOMINAS en ciudades como Bogotá (1995 y 2001), Pereira (1997), Armenia (1999 y 2000), Bucaramanga (2000), Villavicencio (2001), en los que se realizaron 7 campañas de vibración ambiental realizadas su mayoría mediante la utilización de registros de microtrepidaciones y datos sísmicos obtenidos de redes locales de acelerógrafos implementadas en las zonas de estudio, anotando que en la determinación de periodos fundamentales, en el caso de movimientos débiles, los espectros de respuesta, la transformada de Fourier y la técnica de Nakamura, presentan buenos resultados, comparables con los obtenidos con registros sísmicos fuertes.

Sobre la tercera Giraldo *et al* (1999), Safak (1991), Camacho (2000) destacan la importancia del tratamiento, procesamiento y análisis de los registros y su influencia en los resultados. Por ejemplo (Ibs-von Seht & Wohleberg, 1999) realizaron deconvolución de las señales, adquiridas con sensores de velocidad con periodos diferentes (0.5 y 1 Hz) para normalizarlas en 0,5 Hz. Por su parte Stal y Westberg (1996), que utilizaron señales adquiridas con un sensor de velocidad de 1 Hz, en vez de aprovechar las vibraciones detectadas por el sensor por debajo de 1 Hz, aplicaron un filtro pasaltas de 1Hz, argumentando que la respuesta del sensor no es plana por debajo de 1 Hz y por lo tanto no es útil.

Aunque aún no hay un consenso sobre los soportes técnicos que controlan y describen la relación espectral H/V, muchos estudios experimentales muestran que la relación espectral de Nakamura permite diferenciar entre tipos de suelos con características estratigráficas, velocidad de onda S y profundidad a basamento similares. Esa es la gran fortaleza de la herramienta que junto con los bajos costos (solo requiere un sensor de tres componentes); la simpleza y facilidad de las mediciones (se pueden realizar a cualquier hora del día y no requieren más de 10 minutos de registro) y la resolución espacial que permite alcanzar (se puede alcanzar mayor detalle que con redes acelerográficas de movimiento fuerte), la han convertido en una técnica muy atractiva que se ha difundido rápidamente alrededor del mundo. Las ventajas del método han permitido a diversos investigadores y planificadores urbanos la elaboración de mapas preliminares de

zonificación sísmica (o mapas cualitativos), y de zonificación de suelos. Incluso ha servido para modificar planos geotécnicos de ciudades como Lieja, Bélgica (Euroseismod, 1998).

Síntesis. En relación con los parámetros que proporciona la relación espectral H/V, el consenso mínimo entre las diversas experiencias exitosas (ya sea numérica o experimentalmente) muestra los siguientes alcances, limitaciones y rango de validez:

1. Específicamente sirve para determinar los periodos fundamentales de vibración de los suelos.
2. No sirve para identificar otros periodos de vibración (de segundo, tercero o cuarto orden).
3. Funciona muy bien en suelos cuya columna estratigráfica puede estudiarse por el modelo de una sola capa.
4. Modelos de más de una capa, o estructuras geológicas subsuperficiales, afectan los periodos estimados con Nakamura, de tal manera que no se puede predecir el periodo principal de vibración.
5. No se conoce muy bien, a que corresponde la amplificación del cociente espectral de Nakamura; Nakamura (1989) indica que la amplitud máxima de dicho cociente corresponde al factor de amplificación de los suelos, pero múltiples resultados exitosos en la estimación del periodo predominante (comparado con los obtenidos a partir de registro de movimiento fuerte) han fallado en la estimación del factor de amplificación.
6. Los resultados de las mediciones son independientes de la hora del día y no afectan los periodos de vibración estimados.

Con respecto a la explicación de la técnica de Nakamura, existen dos tendencias en la actualidad, la primera argumenta que la relación está controlada por las ondas SH, mientras que la segunda muestra que está controlada por las ondas R. Pero ambas tendencias han demostrado que los periodos calculados del pico de la relación H/V coinciden con los periodos calculados a partir de las ondas S presentes en los registros de movimiento fuerte.

Por otro lado, la falta de aceptación de la metodología de Nakamura para evaluar el factor de amplificación espectral, podría estar relacionado con que capta indistintamente energías generadas sobre el suelo y energías que inciden desde la base. El factor de amplificación depende del cociente de la impedancia (suelo-roca) (Rosales, 2001).

6 MEDIDA DE MICROTREPIDACIONES

Como se discutió en el capítulo anterior las microtrepidaciones han sido usadas para la microzonificación preliminar de muchas ciudades alrededor del mundo. Si bien el factor de amplificación aún no ha sido entendido completamente, la forma general de las relaciones espectrales H/V y en especial en pico fundamental de vibración de dichos espectros permiten aportar a la microzonificación de las ciudades en términos del comportamiento dinámico de los suelos.

El propósito de las mediciones fue caracterizar, en los términos antes descritos, unas zonas de la ciudad, correspondientes a los puntos en estudio. No se busca delimitar la zona con las mediciones, ya que esto implicaría una densidad de puntos mucho mayor, incluyendo mediciones detalladas en las zonas vecinas, sino que busca por un lado el entendimiento y apropiación de la metodología para futuras mediciones en la ciudad, y por otro, la caracterización de los suelos en el área de estudio.

Una vez se cuenta con los equipos de medición, adquisición, almacenamiento y análisis adecuados y probados, la aplicación de la metodología de Nakamura resulta ser muy fácil y rápida.

6.1 EQUIPOS DE MEDICIÓN

Gracias a la colaboración ofrecida por parte del Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS) Bogotá, el equipo con que se desarrollo la primer campaña de medición de microtrepidaciones fue un Sismómetro marca GURALP modelo CMG-40T, triaxial de banda ancha y una unidad de digitalización marca NANOMETRICS modelo ORION; La segunda campaña de medición se realizó con un acelerógrafo modelo ETNA marca NANOMETRICS. Un esquema general para el registro de microtrepidaciones se muestra en la figura 6.1:

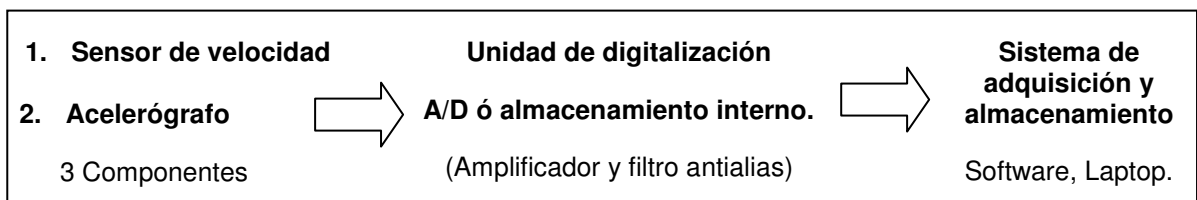


Figura 6.1. Esquema general para el registro de microtrepidaciones.

A continuación se describen las características técnicas de cada uno de los equipos utilizados.

6.1.1 Sensor de velocidad¹⁸

Marca: Guralp, Modelo: CMG-40T. Ver figura 6.2.

Periodo natural: 100 segundos – Respuesta en frecuencia: 0,01 Hz

Amortiguamiento: 0,0707 crítica

Rango dinámico: > 145 dB

Dimensiones: Diámetro de la base: 168 mm

Altura del sensor: 210 mm

Peso del sensor: 5,0 Kg

Sensibilidad: 2 x 400 V/m/s (Salida diferencial).



Figura 6.2. Sensor de velocidad GURALP CMG-40T y Breakbox.

6.1.2 Unidad de digitalización¹⁹

Marca: Nanometrics, Modelo: Orion. Ver figura 6.3.

Dimensiones: Longitud: 47,0 cm

Altura: 37,0 cm

Ancho: 19,0 cm

Peso: 10,9 Kg (24 lbs) incluyendo baterías

Convertidor A/D: 24 bits.

Alimentación: Batería 12V.

Rango de voltaje: $\pm 30V$

Ganancia media de grabado: 0,788 e06 (Cuentas/Voltios)

Amplificación de la ganancia: 0 db.

Filtro: Antialias.

Unidad de almacenamiento: Interna (Disco duro modelo DC 2000). Ver figura 6.3.

¹⁸ Operator's guide. CMG-40T Triaxial Broadband Seismometer. Guralp Systems Aldermaston RG7 8EA U.K. 2004. p. 29

¹⁹ Orion Manual. Nanometrics Inc. Canada K2K 2A1. 1998. p. 95



Figura 6.3. Unidad de digitalización Nanometrics y Disco duro.

6.1.3 Acelerógrafo Etna²⁰

- Rango dinámico: 108 dB cada 200 muestras por segundo
- Frecuencia de respuesta: DC to 80 Hz cada 200 muestras por segundo
- Resolución: 18 bit de resolución cada 200 muestras por segundo
- Tasa de muestreo: 100, 200, 250 muestras por segundo
- Rango de entrada: $\pm 2,5$ V
- Tipo de calibración: Test de secuencia Kinometrics
- Tipo del sensor: Triaxial Episensor Force Balance Accelerometer
Orthogonally Oriented, Internal (Std), External (Opt). Ver figura 6.4.
- Rango de escala máximo: $\pm 0,25g$, $\pm 0,5g$, $\pm 1g$, $\pm 2g$, ó $\pm 4g$.
- Ancho de banda: DC a 200 Hz
- Rango dinámico: 155 dB+
- Unidad de almacenamiento: Interna (Tarjeta tipo PCMCIA de 32 mb). Ver figura 6.4.



Figura 6.4. Acelerómetro ETNA (Interior - Exterior).

²⁰ User Guide. Etna Digital Recorder. Kinometrics, Inc. Switzerland. 2002. p. 118-121

6.2 PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN

6.2.1 Tiempo de registro y tasa de muestreo. Las frecuencias de interés con fines de ingeniería incluyen el rango < 10 Hz, donde se encuentran los modos principales de vibración de los suelos, de tal manera que se escogió una tasa de muestreo de 25 Hz, que cumple con el Teorema de Nyquist; 25 Hz es superior al doble. Las microtrepidaciones se registraron por un lapso de tiempo promedio de 4 minutos. En el caso de los registros adquiridos con el sismógrafo el tiempo de grabado se programó y se realizó automáticamente; con el acelerómetro la orden de inicio y final de registro se realizó por orden manual.

6.2.2 Nomenclatura de archivos

- **GURALP CMG 40T (Sensor de velocidad).** Para el sensor de velocidad los datos fueron almacenados según el orden de componentes establecidas por defecto en el mismo. Una vez terminado el registro de la microtrepidación, en el disco duro del digitalizador se genera un archivo desde el *Ringbuffer* en formato "NANOMETRICS" por cada componente, por ejemplo en el caso del Colegio Inem el archivo generado fue RINEM1S1.BHE, donde R: Proviene de *Ringbuffer*, INEM1: Nombre suministrado (máximo 5 caracteres), S1: Nombre de la estación y *.BHE es la Orientación (n-s, e-w, u-d), además de un archivo con el mismo nombre de extensión SOH (State of Healt) del *Ringbuffer*.

Para poder aplicar a estos registros la metodología de Nakamura es necesario transformarlos a formato ascii, para lo cual se procedió de la siguiente manera:

1. Se deben descargar los archivos localizados en el disco duro del digitalizador en la carpeta USER\DATA a un computador.
2. Con el programa EXTRACTP²¹ del software auxiliar del digitalizador, se obtiene una serie de datos con respecto al tiempo desde los archivos del *Ringbuffer*, creando un archivo por cada componente. El archivo de salida se encuentra comprimido en formato **X5**. La línea de comando para ejecutar este programa es:

```
C:\tesis\extractp -m 2006-03-08-21-50-00 -e 2006-03-08-22-15-00 -d 1500 -l  
c:\tesis\RINEM1S1.BH* -o c:\tesis\output\ -f
```

```
C:\directorío de archivos\extractp -m fecha y hora de inicio del registro -e fecha y hora  
de final del registro -d duración registro (seg) -l c:\directorío de archivos\nombre de la  
señal.BH* -o c:\directorío de salida\ -f
```

3. Después de obtener el archivo en formato **X5**, este se debe descomprimir con el programa X5DECOMP²² generando un archivo en formato Nanometrics **Y5**. El archivo generado tendrá el mismo nombre que el archivo de entrada, excepto la primer letra que cambiará por **Y**. Los archivos **X5** contienen datos comprimidos en bloques, mientras que los generados por X5DECOMP contienen datos descomprimidos en enteros largos de 32 bit. La línea de comando para ejecutar este programa es:

²¹ Playback Manual. Programs in Playback Support (1998). p. 31.

²² Playback Manual. Programs in Playback Support (1998). p. 60.

C:\tesis\output>x5decomp -i C:\tesis\output\x* -o C:\tesis\output

C:\directorio archivos de entrada>x5decomp -i C:\directorio archivos de entrada\archivos que inicien por X * -o C:\directorio de salida

4. Luego de obtener los archivos en formato Nanometrics Y5, se utiliza el programa Y5DUMP²³ para transformarlos en formato ascii. El archivo generado tendrá el mismo nombre que el de entrada mostrando la fecha y hora de inicio del registro. La línea de comando para ejecutar este programa es:

C:\tesis\output>y5dump -d YINEM1S1_BHE_0020060308.215000 > YINEM1S1_BHE_20060308-215000.txt

C:\directorio archivos>y5dump -d archivo de entrada > archivo de salida. extensión.

NOTA: Los significados de los operadores de cada programa se pueden observar en la ayuda en línea del software auxiliar; Los operadores adicionales en las líneas de comando son propios de la programación bajo DOS.

Después de transformar los registros de microtrepidaciones a formato ascii es necesario cambiar su extensión a *.SAF, para hacer posible su lectura y procesamiento con el software J.SESAME (2004); software que será explicado en detalle en el numeral 6.4. Para esto se generó un archivo (bloc de notas) por cada registro, dicho archivo contiene el siguiente código:

| | |
|---------------------------------------|---------------------------|
| SESAME ASCII data format (saf) v. 1 | |
| SAMP_FREQ = 100 | Tasa de muestreo |
| NDAT = 149707 | Número de datos |
| START_TIME=2002 09 29 11 02 08.0 | Hora de inicio |
| STA_CODE= BETH | Código estación |
| UNITS = V | Unidades (serie de datos) |
| CH0_ID = V | Canal 0 – Componente UD |
| CH1_ID = NS | Canal 1 – Componente NS |
| CH2_ID = EW | Canal 2 – Componente EW |
| ####----- | |
| -0.087548223 7.927229695 -7.942027919 | |
| -0.087098985 7.927068528 -7.941879442 | Series de datos. |
| | |

Después de generar este archivo para cada registro se obtiene el registro en .SAF, archivo al cual se le aplica la técnica de Nakamura o relación espectral. En total se realizaron 15 registros con el sensor de velocidad, cada uno grabado con el nombre del sector en el que fue realizado, por ejemplo para el sector del Colegio INEM, el nombre del archivo listo para procesamiento es INEM.SAF

²³ Playback Manual. Programs in Playback Support (1998). p. 61.

- **ACELERÓMETRO ETNA²⁴.** Para el acelerómetro Etna los datos fueron almacenados de tal forma que el canal 3 coincida con el registro de la componente NS, obteniendo la siguiente correspondencia:

| | |
|---------|---------------|
| Canal 1 | Componente EW |
| Canal 2 | Componente UD |
| Canal 3 | Componente NS |

Para el registro de microtrepidaciones se utiliza el programa QuickTalk, necesario para la configuración de los parámetros de adquisición tales como pre-evento, post-evento, tasa de muestreo, test de funcionamiento del acelerómetro, inicio del evento, entre otros. Los archivos generados son archivos estándar bajo DOS. El acelerómetro ETNA usa extensiones de archivo que describen su contenido. Las extensiones pueden ser una de las siguientes:

- .PAR: Archivo de parámetros de comunicaciones creado en QuickTalk.
- .EVT: Archivo creado automáticamente cuando un evento es detectado y el modo de adquisición esta encendido.

Cuando un evento es detectado, el acelerómetro ETNA automáticamente registra en la memoria de tipo PCMCIA, generando un archivo .EVT con las siguientes características:

- El nombre del evento es de la forma xxnnn.evt, donde xx son dos letras que indican el numero de veces que el sistema ha sido reiniciado; nnn es el número de evento; Por ejemplo 001 representaría el primer evento desde que el sistema fue reiniciado.
- Cada vez que se reinicie el registrador, el prefijo xx se incrementará y el número de evento se reiniciara desde 001. El número de evento puede ir hasta 65535.
- El xx tiene un rango desde AA hasta ZZ, haciendo posible 676 reinicios antes de regresar a la combinación AA.

Para descargar los archivos .EVT solo basta copiar los registros de la memoria tipo PCMCIA del acelerómetro a un computador.

Una vez descargados los archivos .EVT estos deben ser convertidos a formato ascii, proceso posible mediante el uso del programa KW2ASC32. La línea de comando de este programa bajo DOS es la siguiente:

C:\>kw2asc32 nombre del archivo .EVT -H

Este proceso genera 3 archivos con la siguiente nomenclatura XX-001.00C; Donde XX indica la componente (N-S, E-W, U-D), 001 es el número de evento y .00C indica el canal de registro (1, 2 ó 3). Por ejemplo: EW-001.001 además de un archivo de extensión .SHD, en el que se puede observar todos los parámetros de adquisición de cada señal, tales como tasa de muestreo, hora de inicio, duración del registro, entre otros.

Obtenidos los registros en formato ascii, la extensión de los mismos fue cambiada a .SAF como se explicó anteriormente; En total se registraron 85 eventos con el acelerómetro ETNA, distribuidos en los 23 sectores en análisis. Cada señal fue grabada con las

²⁴ User Guide. Etna Digital Recorder. Kinematics, Inc. Switzerland. 2002. p. 51-52

iniciales del sector en estudio seguida del número de evento en el sector. Por ejemplo para el sector del colegio INEM, el nombre del archivo del evento 1 listo para procesamiento es INEM1.SAF, ó INEMNOC1.SAF, que indica el evento 1 registrado en horario nocturno.

6.3 SITIOS DE MEDICIÓN Y REGISTROS

6.3.1 Selección de sitios. Se seleccionaron sitios de fácil acceso que cumplieran con los requisitos mencionados en el numeral 5.5.6. La selección de los sitios se realizó teniendo en cuenta la disponibilidad de información geotécnica suficiente para la aplicación de las metodologías descritas en el presente documento, además de que estén ubicados tanto en el valle como en ladera, cubriendo la mayoría de las unidades geotécnicas presentes en la ciudad.

6.3.2 Descripción y registros. En la figura 6.5 se pueden observar la localización de los puntos de medición.

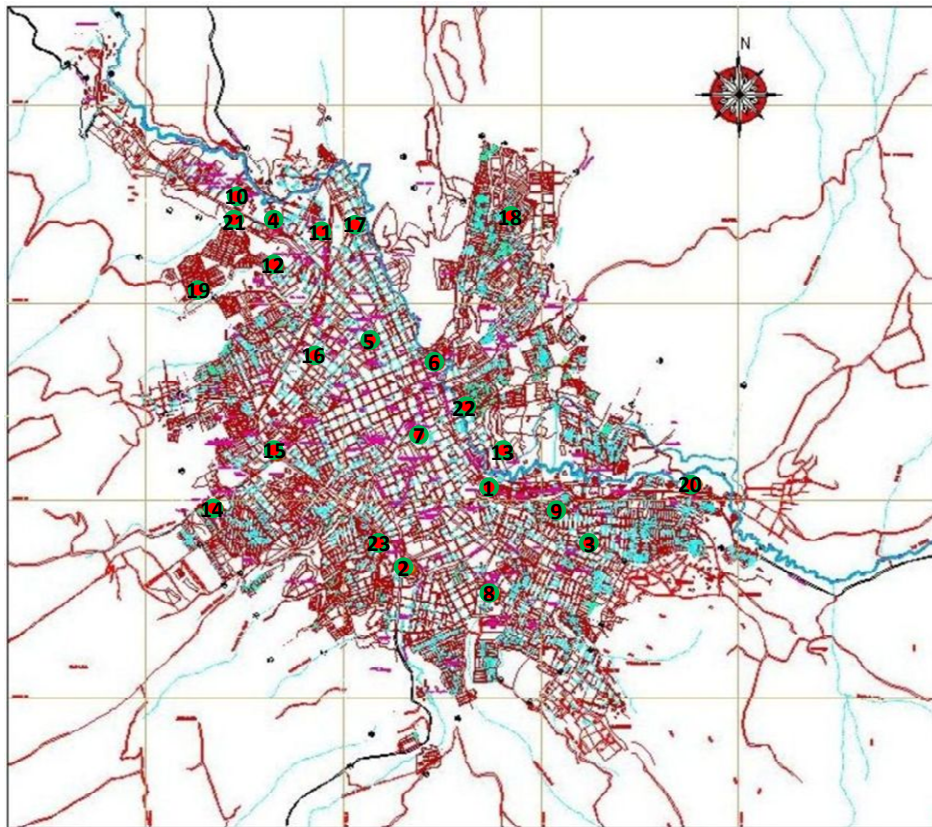


Figura 6.5. Localización puntos de medición.

1. Hospital Departamental

Sitio: Parqueadero principal junto a la carrera séptima y parqueadero ubicado en la esquina de la intersección de la calle 22 con avenida Chile.

Ubicación del sensor: Fue posible ubicar el sensor en un sector alejado de los árboles. Debido al alto tráfico de la zona estas mediciones se realizaron en horario nocturno.

Se realizaron 3 jornadas de medición obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 6.1.

| Jornada | Equipo | Archivo procesado | Punto | Tipo |
|---------|-------------------|-----------------------------|-----------------------|----------|
| 1 | Guralp CMG – 40T | Hospital Departamental .saf | Parqueadero principal | Nocturna |
| 2 | Acelerómetro ETNA | DeptalN1.saf | Parqueadero principal | Nocturna |
| | | DeptalN2.saf | Parqueadero principal | Nocturna |
| | | DeptalN3.saf | Parqueadero principal | Nocturna |
| | | DeptalN4.saf | Parqueadero principal | Nocturna |
| | | DeptalN5.saf | Parqueadero principal | Nocturna |
| | | DeptalN6.saf | Parqueadero principal | Nocturna |
| 3 | Acelerómetro ETNA | Departamental1.saf | Parqueadero calle 22 | Nocturna |
| | | Departamental2.saf | Parqueadero calle 22 | Nocturna |
| | | Departamental3.saf | Parqueadero calle 22 | Nocturna |
| | | Departamental4.saf | Parqueadero calle 22 | Nocturna |
| | | Departamental5.saf | Parqueadero calle 22 | Nocturna |
| | | Departamental6.saf | Parqueadero calle 22 | Nocturna |

Tabla 6.1. Descripción de los registros obtenidos en el Hospital Departamental.

2. Estadio Libertad

Sitio: Cancha de fútbol del estadio.

Ubicación del sensor: Sector que indica el punto medio de la cancha de fútbol.

Se realizaron 3 jornadas de medición obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 6.2.

| Jornada | Equipo | Archivo procesado | Punto | Tipo |
|---------|-------------------|-------------------------------|------------------|----------|
| 1 | Guralp CMG – 40T | Estadio libertad diurna.saf | Cancha de fútbol | Diurna |
| 2 | Guralp CMG – 40T | Estadio libertad nocturno.saf | Cancha de fútbol | Nocturna |
| 3 | Acelerómetro ETNA | Estadio1.saf | Cancha de fútbol | Nocturna |
| | | Estadio2.saf | Cancha de fútbol | Nocturna |
| | | Estadio3.saf | Cancha de fútbol | Nocturna |

Tabla 6.2. Descripción de los registros obtenidos en el Estadio Libertad.

3. Barrio La Paz

Sitio: Parque del barrio, ubicado en la intersección de la carrera 7E con calle 18C.

Ubicación del sensor: Centro del parque.

Se realizó 1 jornada de medición obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 6.3.

| Jornada | Equipo | Archivo procesado | Punto | Tipo |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|----------|
| 1 | Acelerómetro ETNA | Lapaz1.saf | Centro del parque | Nocturna |
| | | Lapaz2.saf | Centro del parque | Nocturna |
| | | Lapaz3.saf | Centro del parque | Nocturna |

Tabla 6.3. Descripción de los registros obtenidos en el Barrio La Paz.

4. Barrio Pandiaco

Sitio: Parqueadero ubicado en la esquina de la intersección de la calle 18B con carrera 45.

Ubicación del sensor: Entrada al parqueadero.

Se realizó 1 jornada de medición obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 6.4.

| Jornada | Equipo | Archivo procesado | Punto | Tipo |
|---------|-------------------|-------------------|---------------------|----------|
| 1 | Acelerómetro ETNA | Pandiaco1.saf | Entrada parqueadero | Nocturna |
| | | Pandiaco2.saf | Entrada parqueadero | Nocturna |
| | | Pandiaco3.saf | Entrada parqueadero | Nocturna |

Tabla 6.4. Descripción de los registros obtenidos en el Barrio Pandiaco

5. Parque Infantil

Sitio: Zona verde junto a la cancha de microfútbol cercana a la esquina de la intersección de la carrera 31 con calle 17.

Ubicación del sensor: Punto central de la zona verde.

Se realizaron 2 jornadas de medición obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 6.5.

| Jornada | Equipo | Archivo procesado | Punto | Tipo |
|---------|-------------------|--------------------|------------|----------|
| 1 | Guralp CMG – 40T | Parqueinfantil.saf | Zona verde | Nocturna |
| 2 | Acelerómetro ETNA | Parque1.saf | Zona verde | Nocturna |
| | | Parque2.saf | Zona verde | Nocturna |
| | | Parque3.saf | Zona verde | Nocturna |
| | | Parque4.saf | Zona verde | Nocturna |
| | | Parque5.saf | Zona verde | Nocturna |

Tabla 6.5. Descripción de los registros obtenidos en el Parque Infantil.

6. Sector Dos Puentes

Sitio: Parque ubicado frente al colegio Pedagógico junto a la carrera 26.

Ubicación del sensor: Centro del Parque alejado del río Pasto y de los árboles.

Se realizó 1 jornada de medición obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 6.6.

| Jornada | Equipo | Archivo procesado | Punto | Tipo |
|---------|-------------------|-------------------|---------------|----------|
| 1 | Acelerómetro ETNA | Pedagogico1.saf | Centro parque | Nocturna |
| | | Pedagogico2.saf | Centro parque | Nocturna |

Tabla 6.6. Descripción de los registros obtenidos en el Sector dos Puentes.

7. Plaza del Carnaval

Sitio: Sector de la calle 19B, calle sin pavimento en donde se puede encontrar el suelo sin mejoramiento, caso contrario a lo que ocurre en el centro de la Plaza del Carnaval.

Ubicación del sensor: Al lado izquierdo de la calle alejado del sistema de acueducto y alcantarillado.

Se realizaron 2 jornadas de medición obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 6.7.

| Jornada | Equipo | Archivo procesado | Punto | Tipo |
|---------|-------------------|----------------------|-----------|----------|
| 1 | Guralp CMG – 40T | Plazadelcarnaval.saf | Calle 19B | Nocturna |
| 2 | Acelerómetro ETNA | Plazacar1.saf | Calle 19B | Nocturna |
| | | Plazacar2.saf | Calle 19B | Nocturna |
| | | Plazacar3.saf | Calle 19B | Nocturna |

Tabla 6.7. Descripción de los registros obtenidos en la Plaza del Carnaval.

8. Sector Potrerillo

Sitio: Área sin pavimento ubicada en la intersección de la calle 15 con carrera 7B.

Ubicación del sensor: Centro del sector mencionado, alejado de los edificios presentes en la zona.

Se realizaron 2 jornadas de medición obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 6.8.

| Jornada | Equipo | Archivo procesado | Punto | Tipo |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|----------|
| 1 | Guralp CMG – 40T | Potrerillo.saf | Centro del sector | Nocturna |
| 2 | Acelerómetro ETNA | Potrerillo1.saf | Centro del sector | Nocturna |
| | | Potrerillo2.saf | Centro del sector | Nocturna |
| | | Potrerillo3.saf | Centro del sector | Nocturna |

Tabla 6.8. Descripción de los registros obtenidos en el Sector Potrerillo.

9. Barrio El Tejar

Sitio: Cancha de fútbol ubicada en la calle 18ª con carrera 2E.

Ubicación del sensor: Sector que indica el punto medio de la cancha de fútbol.

Se realizó 1 jornada de medición obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 6.9.

| Jornada | Equipo | Archivo procesado | Punto | Tipo |
|---------|-------------------|-------------------|---------------------|----------|
| 1 | Acelerómetro ETNA | Tejar1.saf | Centro de la cancha | Nocturna |
| | | Tejar2.saf | Centro de la cancha | Nocturna |
| | | Tejar3.saf | Centro de la cancha | Nocturna |
| | | Tejar4.saf | Centro de la cancha | Nocturna |

Tabla 6.9. Descripción de los registros obtenidos en el Barrio El Tejar.

10. Universidad de Nariño

a. Cancha de fútbol B.

Sitio: Zona verde ubicada en la parte derecha de la cancha junto a los bancos de jugadores.

Ubicación del sensor: Punto ubicado alejado de la presencia de postes de energía y árboles.

b. Facultad de Ingeniería

Sitio: Zona verde ubicada frente al laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería.

Ubicación del sensor: Punto ubicado hacia el centro de la zona verde alejado de la presencia de postes de energía y árboles.

Se realizaron 2 jornadas de medición obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 6.10.

| Jornada | Equipo | Archivo procesado | Punto | Tipo |
|---------|-------------------|-------------------|--------------------------|----------|
| 1 | Guralp CMG – 40T | UDENAR.saf | Cancha | Diurna |
| 2 | Acelerómetro ETNA | Udenarnozv1.saf | Zona verde – Laboratorio | Nocturna |
| | | Udenarnozv2.saf | Zona verde – Laboratorio | Nocturna |
| | | Udenarnozv3.saf | Zona verde – Laboratorio | Nocturna |

Tabla 6.10. Descripción de los registros obtenidos en la Universidad de Nariño.

11. Torres Valle de Atriz

Sitio: Lote ubicado entre la carrera 44 y avenida Panamericana, junto a Torres Valle de Atriz.

Ubicación del sensor: Centro del lote.

Se realizaron 2 jornadas de medición obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 6.11.

| Jornada | Equipo | Archivo procesado | Punto | Tipo |
|---------|-------------------|-------------------|-------------|----------|
| 1 | Guralp CMG – 40T | Valledeatriz.saf | Centro lote | Nocturna |
| 2 | Acelerómetro ETNA | Valle1.saf | Centro lote | Nocturna |
| | | Valle2.saf | Centro lote | Nocturna |
| | | Valle3.saf | Centro lote | Nocturna |

Tabla 6.11. Descripción de los registros obtenidos en las Torres de Valle de Atriz.

12. Colegio Bethlemitas

Sitio: Cancha de fútbol ubicada en la parte trasera del teatro del colegio.

Ubicación del sensor: Sector que indica el punto medio de la cancha de fútbol.

Se realizaron 2 jornadas de medición obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 6.12.

| Jornada | Equipo | Archivo procesado | Punto | Tipo |
|---------|-------------------|-------------------|---------------|--------|
| 1 | Guralp CMG – 40T | Bethlemitas1.saf | Centro cancha | Diurna |
| 2 | Acelerómetro ETNA | Bethle1.saf | Centro cancha | Diurna |
| | | Bethle1.saf | Centro cancha | Diurna |
| | | Bethle1.saf | Centro cancha | Diurna |

Tabla 6.12. Descripción de los registros obtenidos en el Colegio Bethlemitas.

13. Empopasto Centenario

Sitio: Zona verde al lado izquierdo de la entrada a la empresa.

Ubicación del sensor: Punto central de la zona alejado de la presencia de árboles y cubierto con un recipiente para protección del viento.

Se realizaron 2 jornadas de medición obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 6.13.

| Jornada | Equipo | Archivo procesado | Punto | Tipo |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|--------|
| 1 | Guralp CMG – 40T | Centenario.saf | Centro zona verde | Diurna |
| 2 | Acelerómetro ETNA | Empocent1.saf | Centro zona verde | Diurna |
| | | Empocent2.saf | Centro zona verde | Diurna |
| | | Empocent3.saf | Centro zona verde | Diurna |

Tabla 6.13. Descripción de los registros obtenidos en Empopasto Centenario.

14. Empopasto San Felipe

Sitio: Cancha de fútbol ubicada entre las instalaciones de Empopasto y la quebrada Mijitayo.

Ubicación del sensor: Punto central de la cancha alejado de la presencia de los árboles y de la quebrada en mención.

Se realizaron 2 jornadas de medición obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 6.14.

| Jornada | Equipo | Archivo procesado | Punto | Tipo |
|---------|-------------------|--------------------------|---------------|--------|
| 1 | Guralp CMG – 40T | Empopasto San Felipe.saf | Centro cancha | Diurna |
| 2 | Acelerómetro ETNA | Emposf1.saf | Centro cancha | Diurna |
| | | Emposf2.saf | Centro cancha | Diurna |
| | | Emposf3.saf | Centro cancha | Diurna |

Tabla 6.14. Descripción de los registros obtenidos en Empopasto San Felipe.

15. Colegio INEM

Sitio: Cancha de fútbol del colegio.

Ubicación del sensor: Sector que indica el punto medio de la cancha de fútbol.

Se realizaron 3 jornadas de medición obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 6.15.

| Jornada | Equipo | Archivo procesado | Punto | Tipo |
|---------|-------------------|-------------------|---------------|----------|
| 1 | Guralp CMG – 40T | INEM.saf | Centro cancha | Diurna |
| 2 | Acelerómetro ETNA | INEM1.saf | Centro cancha | Diurna |
| | | INEM2.saf | Centro cancha | Diurna |
| 3 | Acelerómetro ETNA | INEMNOC1.saf | Centro cancha | Nocturna |
| | | INEMNOC2.saf | Centro cancha | Nocturna |

Tabla 6.15. Descripción de los registros obtenidos en el Colegio INEM.

16. Colegio San Francisco Javier – Primaria

Sitio: Lote ubicado en la calle 9 con carrera 34.

Ubicación del sensor: Centro del lote.

Se realizaron 2 jornadas de medición obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 6.16.

| Jornada | Equipo | Archivo procesado | Punto | Tipo |
|---------|-------------------|-------------------|-------------|----------|
| 1 | Guralp CMG – 40T | Javeriano.saf | Centro lote | Nocturna |
| 3 | Acelerómetro ETNA | Javenoc1.saf | Centro lote | Nocturna |
| | | Javenoc2.saf | Centro lote | Nocturna |

Tabla 6.16. Descripción de los registros obtenidos en el Colegio San Francisco Javier - Primaria.

17. Sector Morasurco

Sitio: Lote ubicado en la calle 22 con carrera 43.

Ubicación del sensor: Centro del lote.

Se realizaron 2 jornadas de medición obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 6.17.

| Jornada | Equipo | Archivo procesado | Punto | Tipo |
|---------|-------------------|-------------------|-------------|--------|
| 1 | Guralp CMG – 40T | Morasurco.saf | Centro lote | Diurna |
| 2 | Acelerómetro ETNA | Mora1.saf | Centro lote | Diurna |
| | | Mora2.saf | Centro lote | Diurna |
| | | Mora3.saf | Centro lote | Diurna |
| | | Mora4.saf | Centro lote | Diurna |

Tabla 6.17. Descripción de los registros obtenidos en el Sector Morasurco.

18. Barrio Nueva Aranda

Sitio: Lote ubicado en cercanías al barrio.

Ubicación del sensor: Centro del lote alejado del tráfico vehicular y peatonal.

Se realizó 1 jornada de medición obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 6.18.

| Jornada | Equipo | Archivo procesado | Punto | Tipo |
|---------|-------------------|-------------------|-------------|--------|
| 1 | Acelerómetro ETNA | Aranda1.saf | Centro lote | Diurna |
| | | Aranda2.saf | Centro lote | Diurna |
| | | Aranda3.saf | Centro lote | Diurna |
| | | Aranda4.saf | Centro lote | Diurna |
| | | Aranda5.saf | Centro lote | Diurna |

Tabla 6.18. Descripción de los registros obtenidos en el Barrio Nueva Aranda.

19. Lote Colegio Nuevo Javeriano

Sitio: Lote ubicado diagonal al Hospital San Pedro.

Ubicación del sensor: Punto del lote ubicado lejos de la presencia de postes de energía.

Se realizaron 2 jornadas de medición obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 6.19.

| Jornada | Equipo | Archivo procesado | Punto | Tipo |
|---------|-------------------|---------------------|-------------|--------|
| 1 | Guralp CMG – 40T | Nuevo Javeriano.saf | Centro lote | Diurna |
| 2 | Acelerómetro ETNA | NuevoJave1.saf | Centro lote | Diurna |
| | | NuevoJave2.saf | Centro lote | Diurna |

Tabla 6.19. Descripción de los registros obtenidos en el Lote del Colegio Nuevo Javeriano.

20. Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA

Sitio: Sector de las instalaciones ubicado en la parte derecha de la entrada – Salida al oriente de la ciudad.

Ubicación del sensor: Punto central del sector alejado del tráfico vehicular y peatonal.

Se realizó 1 jornada de medición obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 20.

| Jornada | Equipo | Archivo procesado | Punto | Tipo |
|---------|-------------------|-------------------|--------------|--------|
| 1 | Acelerómetro ETNA | SENA1.saf | Entrada SENA | Diurna |
| | | SENA2.saf | Entrada SENA | Diurna |
| | | SENA3.saf | Entrada SENA | Diurna |
| | | SENA4.saf | Entrada SENA | Diurna |

Tabla 6.20. Descripción de los registros obtenidos en el SENA.

21. Universidad de Nariño – Facultad de Artes

Sitio: Sector de las instalaciones ubicado en la parte izquierda del bloque principal.

Ubicación del sensor: Punto central del sector alejado del tráfico vehicular y peatonal.

Se realizó 1 jornada de medición obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 6.21.

| Jornada | Equipo | Archivo procesado | Punto | Tipo |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|--------|
| 1 | Acelerómetro ETNA | UDENAR1.saf | Centro del Sector | Diurna |
| | | UDENAR2.saf | Centro del Sector | Diurna |
| | | UDENAR3.saf | Centro del Sector | Diurna |
| | | UDENAR4.saf | Centro del Sector | Diurna |

Tabla 6.21. Descripción de los registros obtenidos en la Universidad de Nariño - Facartes.

22. Barrio Aquine

Sitio: Zona verde frente a la manzana D del sector 2 del Barrio Aquine 3.

Ubicación del sensor: Punto central de la zona verde en mención.

Se realizó 1 jornada de medición obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 6.22.

| Jornada | Equipo | Archivo procesado | Punto | Tipo |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|----------|
| 1 | Acelerómetro ETNA | Aquine1.saf | Centro del Sector | Nocturna |
| | | Aquine2.saf | Centro del Sector | Nocturna |
| | | Aquine3.saf | Centro del Sector | Nocturna |

Tabla 6.22. Descripción de los registros obtenidos en el Barrio Aquine.

23. Colegio Libertad

Sitio: Cancha de microfútbol del colegio y zona verde frente a las oficinas del Colegio.

Ubicación del sensor: Punto medio de la cancha y centro de la zona verde.

Se realizaron 2 jornadas de medición obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 6.23.

| Jornada | Equipo | Archivo procesado | Punto | Tipo |
|---------|-------------------|---------------------|-------------------|----------|
| 1 | Guralp CMG – 40T | ColegioLibertad.saf | Centro cancha | Diurna |
| 2 | Acelerómetro ETNA | Coliber1.saf | Centro zona verde | Nocturna |
| | | Coliber2.saf | Centro zona verde | Nocturna |
| | | Coliber3.saf | Centro zona verde | Nocturna |
| | | Coliber4.saf | Centro zona verde | Nocturna |

Tabla 6.23. Descripción de los registros obtenidos en el Colegio Libertad.

6.4 PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES

Las señales en formato .SAF fueron analizadas con el software J-SESAME Versión 1.08 (2004). Todo el procesamiento y análisis de las señales fue realizado a través de rutinas escritas en Fortran ejecutadas bajo entorno JAVA contenidas en dicho software. El procesamiento y análisis de las señales se explicará referenciados al uso del software J-SESAME (2004).

SESAME H/V SOFTWARE: MÓDULO DE PROCESAMIENTO PRINCIPAL – HVPROC

El módulo de procesamiento principal realiza el análisis básico desarrollado para la estimación de la proporción de H/V.

Los pasos principales ejecutados por el código son los siguientes:

1. Lectura de las señales de entrada
2. Corrección de Offset (Línea base)
3. Para cada ventana de tiempo seleccionada dentro de las señales de entrada
 - a. Tapering (Efecto *leaking* o truncado)
 - b. FFT
 - c. Suavizado del espectro de Fourier
 - d. Fusión de las componentes horizontales
 - e. Relación Espectral H/V
 - f. Resultados de una ventana H/V y espectros
4. Resultados de la media de los espectros
5. Promedio de H/V
6. Cálculo de F_0
7. Resultados generales

El código se corre automáticamente dentro del paquete de J-SESAME, (2004) pero también puede correrse como una llamada de línea de orden de la siguiente manera:

- Hvproc0_1 ***winfile parfile outfile***

Winfile: es el archivo que lista la ventana de tiempo a ser analizada

Parfile: contiene los parámetros para el proceso

Outfile: es el nombre del archivo de resultados generales

WINFILE: Este archivo lista las ventanas seleccionadas usadas para el proceso. Tales ventanas pueden ser escogidas automáticamente por el " módulo de selección " de ventana.

La estructura del ***winfile*** es la siguiente:

```
D:\Sesame\Data\file1.gse 5.1 19.3 1 EHZ EHN EHE TST
D:\Data\file2.saf 0.1 14.3 2
D:\Data\file3.cts 123.0 137.2 3
```

Donde:

Columna 1: Nombre de la señal de entrada (tres componentes)

Columna 2: Tiempo de inicio de la ventana seleccionada (en segundos de la primera muestra del archivo)

Columna 3: Tiempo final de la ventana seleccionada (en segundos de la primera muestra del archivo)

Columna 4: Formato identificador (1 = GSE; 2 = SAF; 3 = City Shark) (*)

Columna 5: Etiqueta del canal vertical - sólo para formato GSE (* *)

Columna 6: Etiqueta del canal 1 horizontal - sólo para formato GSE (* *)

Columna 7: Etiqueta del canal 2 horizontal - sólo para formato GSE (* *)

Columna 8: Etiqueta de nombre de estación - sólo para formato GSE (* *) (* * *)

(*) La definición de formato de SAF se da a continuación

(* *) Los archivos GSE pueden contener historias de tiempo que vienen de estaciones diferentes. El código buscará aquéllos identificados por el canal dado y etiquetas de la estación.

(***) La etiqueta de la estación puede omitirse. En este caso el código buscará la pertenencia de los canales a la primera estación encontrada en el archivo

Los datos pueden venir de secciones diferentes de la misma señal o de señales diferentes, la única limitación es que la tasa de muestreo debe estar inalterada.

Aunque no sería aconsejable, las longitudes de ventana de tiempo pueden ser diferentes.

El código pondrá la duración de tiempo por los análisis como el máximo encontrado y completará con ceros las ventanas más cortas.

PARFILE: En este archivo se listan los parámetros necesarios para el proceso, el código considera la sección del archivo o ventana seleccionada entre las siguientes líneas:

procesando la sección

terminando el procesamiento

Las líneas de comentario empiezan con un carácter '#'.

Las opciones para el proceso son las siguientes:

1. **Rango de frecuencias.** Los resultados de los valores de la relación H/V y espectros son procesados para los valores de frecuencia definidos por esta opción.

Línea de comando: freq_spacing:<type>[:<arg1>:<arg2>:<arg3>]
 type arg1 arg2 arg3
 fft - - -
 fft_red f_min f_max -
 linear f_min f_max #_points
 log f_min f_max #_points

En algunos casos el código tiene que modificar el límite puesto por el usuario, una advertencia se emite entonces (mensaje de error).

2. **Remoción de offset (Corrección línea base).** El desplazamiento (offset) puede calcularse en el registro entero o en cada una de las ventanas seleccionadas **[all; win]**. El filtro Pasa Altas se realiza en todo el registro **[high-pass]**

Líneas de comando: offset_rem:<type>[:<arg>]
 type arg1 arg2
 no - -
 r_mean all -
 r_mean win -
 high-pass frequency -
 band-pass frequency_1 frequency_2

3. **Tapering (Efecto leaking o truncado).** Puede ponerse el porcentaje de la ventana que es afectado por el código en ambos extremos. (*boxcar* no representa ninguna corrección; *cos* representa corrección por “*Hanning*”)

Líneas de comando: taper:<type>[:<arg>]
 type arg1
 boxcar -
 cos percentage

4. **Suavizado.** Se suavizan los valores de los espectros de Fourier antes del cálculo de la relación de H/V. Cuando la ventana “suavizadora” requiere valores del espectro fuera del rango (0 - $F_{Nyquist}$), entonces el espectro suavizado se restringirá al intervalo de frecuencia significativa.

Líneas de comando: smooth:<type>[:<arg1>[:<arg2>]]
 type arg1 arg2
 none - - (1)
 linear bandwidth box (2)
 linear bandwidth tri (3)
 log percentage box (4)
 log percentage tri (5)
 konno-ohmachi bandwidth (6)

1. Retiene los valores resultantes de la FFT
2. Suavizado con ventana constante en el intervalo $[f-bw/2 \ f+bw/2]$
3. Suavizado con ventana triangular sobre el intervalo lineal $[f-bw/2 \ f+bw/2]$
4. Suavizado con ventana constante sobre el intervalo logarítmico $[f/(1+p/100) \ f*(1+p/100)]$
5. Suavizado con ventana triangular sobre el intervalo logarítmico $[f/(1+p/100) \ f*(1+p/100)]$
6. Suavizado con la ventana de Konno-Ohmachi

5. **Unión de las componentes horizontales.** Los dos espectros horizontales suavizados se unen según esta opción.

Líneas de comando: merge_type:<type>
 type
 arithmetic $(H_{ew}+H_{ns})/2$
 geometric $\sqrt{H_{ew}*H_{ns}}$
 quadratic $\sqrt{(H_{ew}^2+H_{ns}^2)/2}$
 complex FFT of the complex time history
 $f(t)=ew(t)+i*ns(t)$.
 Spectral values are divided by $\sqrt{2}$

6. **Resultados de una sola ventana de información.**

Líneas de comando: single_win_out:<arg>
 arg is either 'yes' or 'no'

En caso de 'yes', para cada ventana de tiempo se crea un archivo de resultados separado. El nombre del archivo es el nombre de archivo de resultados con la

extensión ' _win_ ###', ### indicando el número de la ventana de tiempo en la secuencia del archivo #2. Cada archivo contiene las siguientes columnas: Frecuencia, unión H/V, H/V ns, H/V ew , espectro NS, espectro EW

7. **Resultados promedio del espectro de Fourier suavizado**

Líneas de comando: average_spectra_out:<arg>
 arg is either 'yes' or 'no'

En caso de ' yes' se crea un archivo de resultados adicional. El nombre del archivo es el nombre de archivo de resultados con extensión ' _sp'. El archivo contiene las siguientes columnas:

Frecuencia, espectro vertical, espectro NS, espectro EW, s.d. Vert., s.d. NS, s.d. EW
s.d: Desviación estándar.

VALORES POR DEFECTO

Los siguientes valores predefinidos se usan en el procesamiento en caso de que los parámetros correspondientes no sean establecidos en el *parfile*

- freq_spacing:fft
- offset_rem:r_mean:all
- taper:cos:5
- smooth:konno-ohmachi:40
- merge_type:quadratic
- single_win_out:no
- average_spectra_out:no

VALORES UTILIZADOS PARA PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES

Los siguientes valores fueron los seleccionados para el procesamiento de las señales de microtrepidaciones registradas, con el sensor de velocidad y acelerómetro con ventanas automáticas y manuales de 10 segundos para una tasa de muestreo de 200 muestras por segundo y de 20 segundos para una tasa de muestreo de 100 muestras por segundo.

- freq_spacing:linear 0.1:30:2116
- offset_rem:r_mean:all
- taper:cos:5
- smooth:konno-ohmachi:40
- merge_type:quadratic
- single_win_out:yes
- average_spectra_out:no
- Filtro pasabanda 0.1 – 14 Hz

ARCHIVOS DE SALIDA

Este archivo lista:

- Las ventanas usadas en el procesamiento
 - Los parámetros usados en el procesamiento
 - El número de ventanas y número de valores de frecuencia
 - F_0 y el rango correspondiente a ± 1 s.d. (Desviación Estándar)
 - Los valores promedio de HV y s.d correspondiente, para cada valor de frecuencia:
- J-SESAME (2004), define el nombre de archivo de resultados automáticamente (qué es el mismo de entrada .SAF o .GSE, archivos con la extensión ".OUT"), si el mismo archivo de entrada se reprocesa, el archivo del resultados se sobrescribe.

TAMAÑO ARCHIVOS DE ENTRADA

Actualmente el código puede leer las señales de entrada con el número de muestras por canal de 600000, el proceso puede realizarse con (aproximadamente) $n_{freq} * n_{win} < 1000000$, dónde:

n_{freq} = el número de valores de frecuencia de resultados

n_{win} = el número de ventanas consideradas

El procedimiento general para obtener la relación espectral H/V se indica en la figura 6.6.

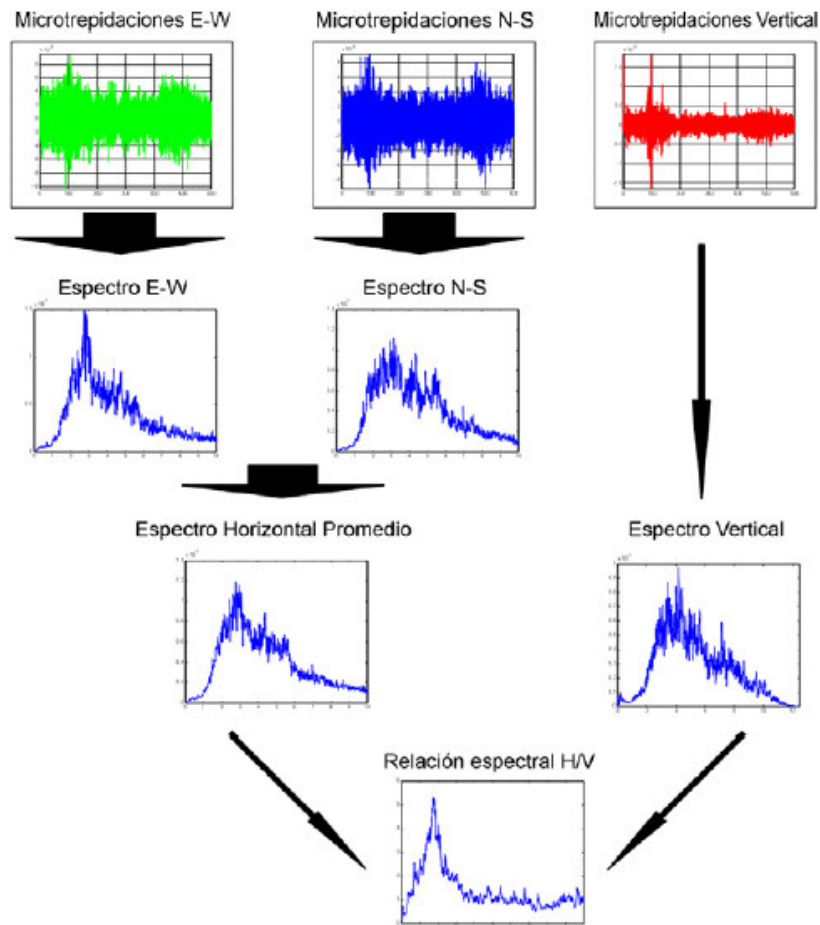


Figura 6.6. Procedimiento para obtener la relación espectral H/V (Rosales, 2001)

El procedimiento general a partir del software J-SESAME (2004), para obtener la relación espectral H/V se indica en las figura 6.7 a 6.14.

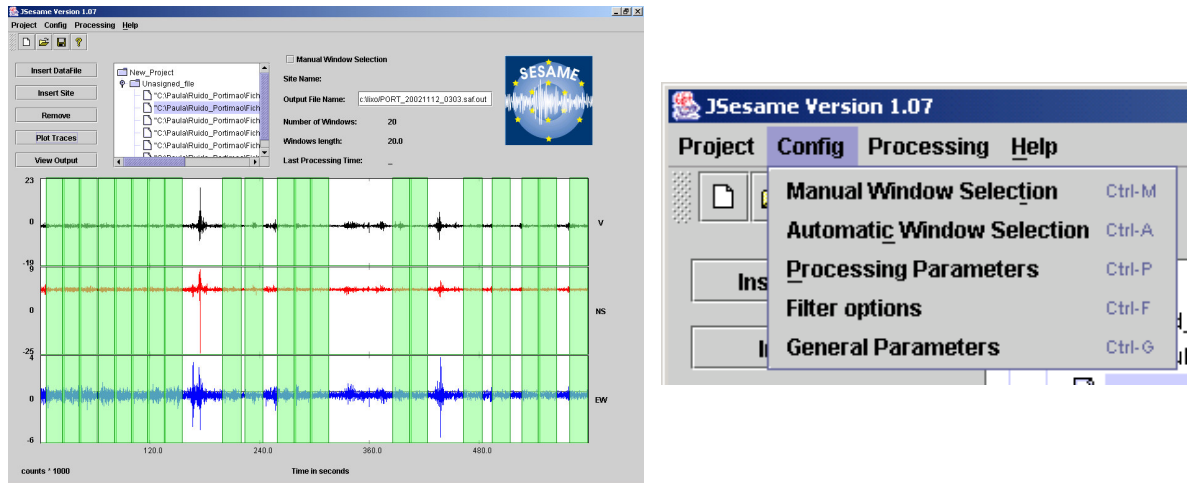


Figura 6.7. Ventana principal y menú de configuración

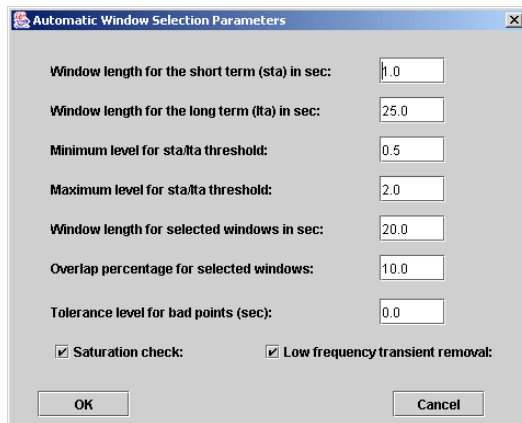


Figura 6.8. Parámetros de selección automática de ventanas.

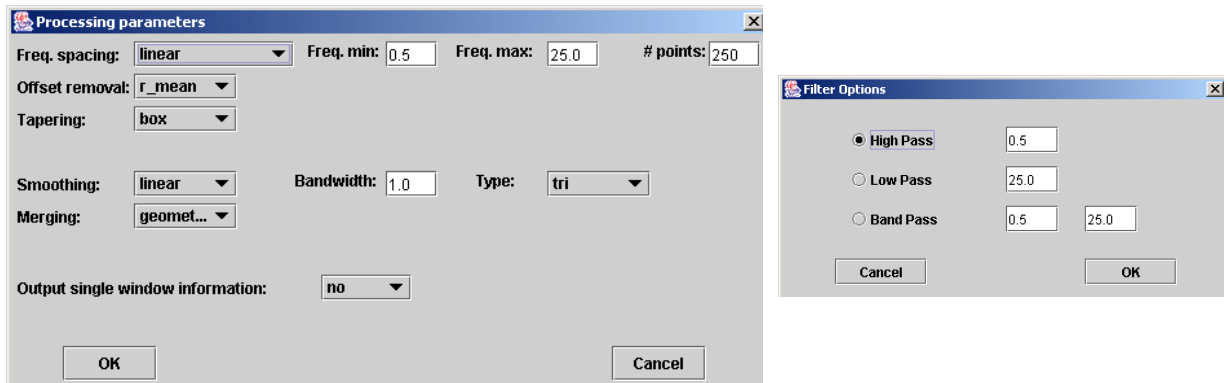


Figura 6.9. Parámetros del módulo de procesamiento de la relación espectral H/V y opciones de filtros.

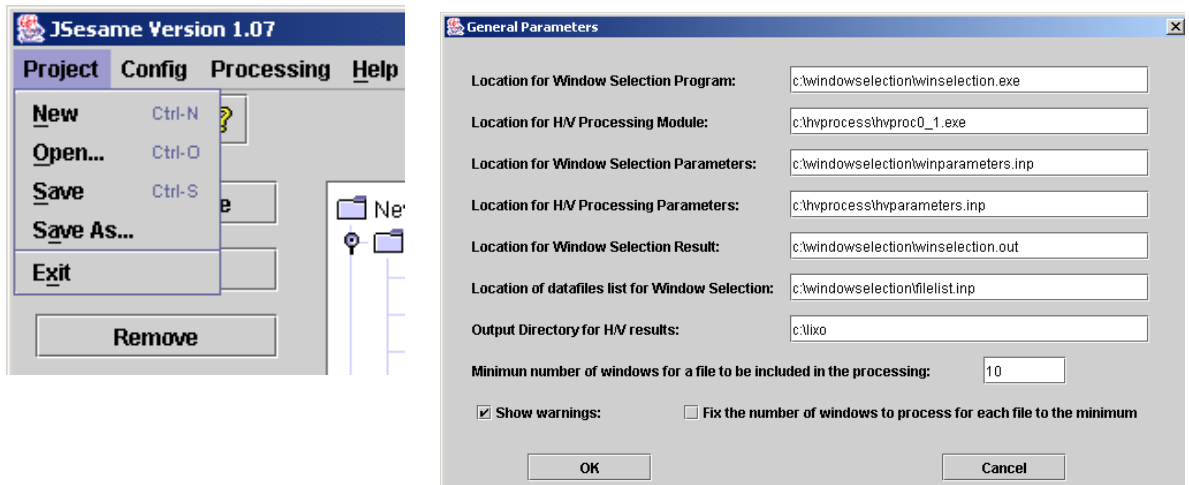


Figura 6.10. Parámetros generales y opciones del proyecto.

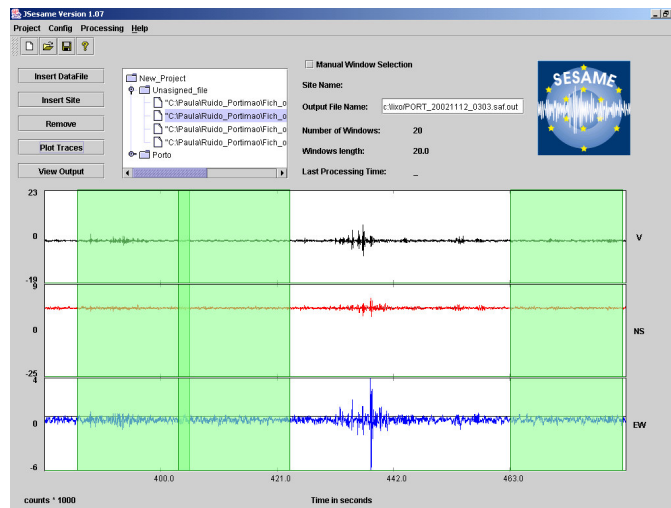


Figura 6.11. Vista en zoom de las trazas con las ventanas seleccionadas.

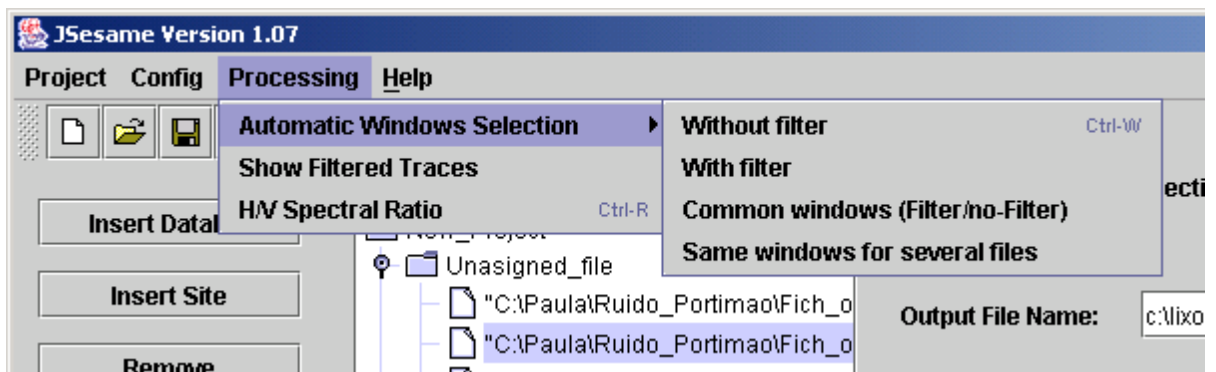


Figura 6.12. Opciones de procesamiento.

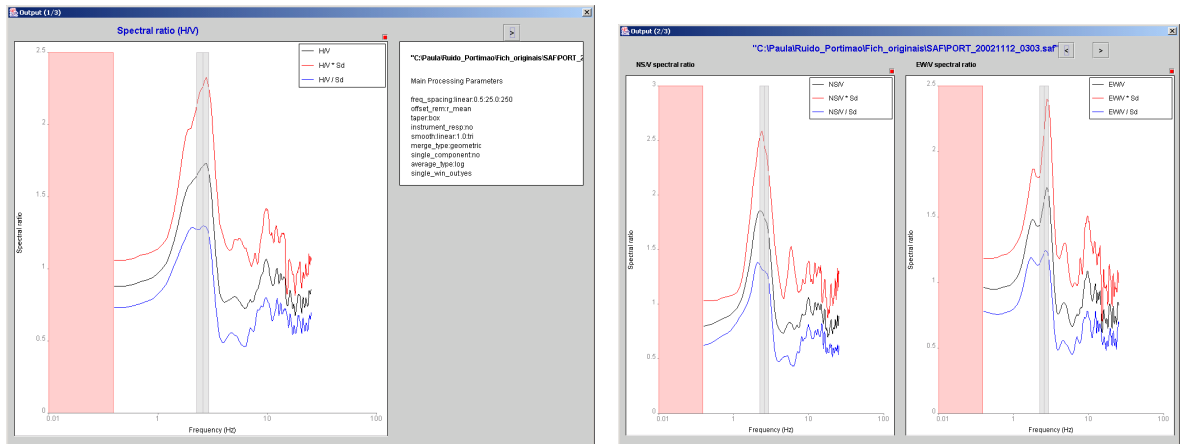


Figura 6.13. Relación espectral para el promedio de las componentes horizontales y relación espectral para cada componente horizontal NS y EW.

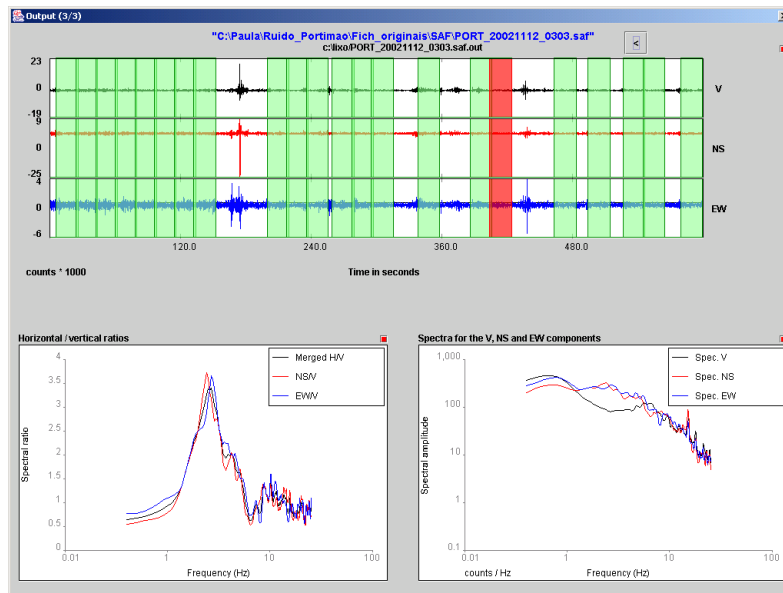


Figura 6.14. Resultado para ventanas individuales.

6.5 RESULTADOS PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES

Las ventanas de las señales seleccionadas, las cuales se listan en la columna 7 de la Tabla 6.24, fueron analizadas según los pasos descritos en los anteriores numerales. Una vez obtenidos los espectros de frecuencias H/V para cada señal seleccionada, estos se analizaron en términos de su contenido espectral, frecuencia y el factor de amplificación de cada una.

6.5.1 Periodos fundamentales. Las señales de microtrepidaciones no presentan picos fundamentales tan precisamente definidos como es el caso, por ejemplo, de señales armónicas. Producto del tratamiento y suavizado de las señales, el pico puede aparecer achatado o desplazado con respecto al conjunto de la señal de mayores amplitudes. Para definir homogéneamente el valor del pico fundamental, se decidió, en todos los casos, leer las frecuencias correspondientes al máximo pico, siempre y cuando este coincida en por lo menos dos componentes con una desviación estándar menor al 5%. En caso de duda o picos muy disimiles, se considera como un indicativo para revisar las señales, la selección de ventana útil o su suavizado.

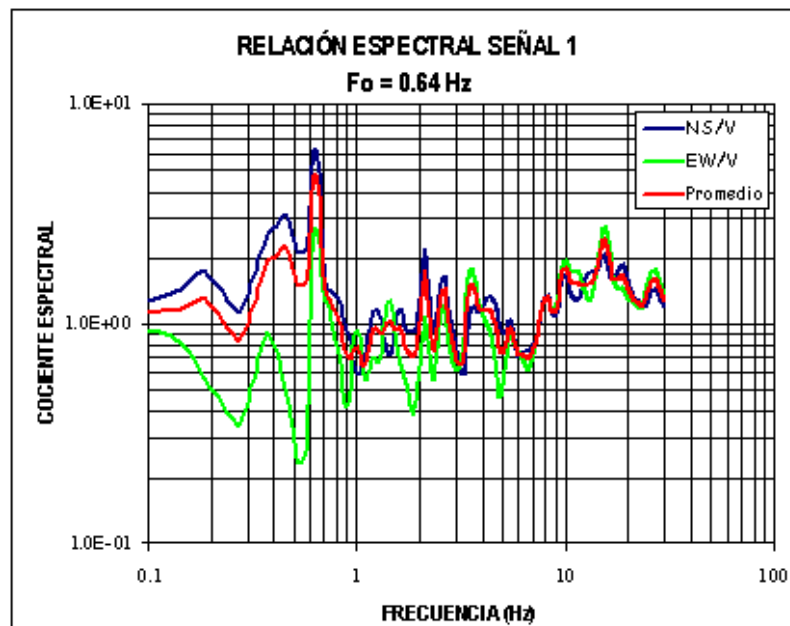


Figura 6.15. Ejemplo de lectura del pico fundamental de la señal 2, en el sector del Estadio Libertad.

En la tabla 6.24 se muestran los valores de frecuencias fundamentales para las ventanas seleccionadas en cada señal en los diversos sitios de medición. Se incluyen, además, la hora de inicio del registro, la frecuencia de muestreo, la duración en segundos, el número de ventanas seleccionadas, la duración de la ventana (seg), rango de frecuencias (Hz), periodo (seg) y las coordenadas NS-EW de cada punto en análisis. El espectro promedio H, el V y la relación espectral H/V de Nakamura de todas las señales seleccionadas se presentan en el Anexo 1.

6.5.2 Factor de amplificación. El cálculo de las amplitudes a partir de los espectros H/V obtenido presentó una alta sensibilidad al tratamiento dado a las señales. Mientras que el periodo no mostró variabilidad al tratamiento, las amplitudes se hacían mayores con ventanas de análisis de menos muestras y viceversa. Las variaciones en la amplitud según el tamaño de las ventanas podían ser de 5 a 10. No se encontraron referencias sobre un tratamiento que mostrara estabilidad en las amplitudes, por lo cual se decidió analizar, solo con fines demostrativos, las amplitudes relativas con un solo tratamiento.

Los valores calculados corresponden a la amplitud máxima del pico fundamental de vibración, con ventanas de 10 y 20 segundos para una tasa de muestreo de 200 y 100 muestras por segundo respectivamente. Los resultados se muestran en la Tabla 6.25.

| | SITIO | SEÑAL | VENTANA SELECCIONADA | AMPLITUD DE F_0 PARA CADA VENTANA | AMPLITUD DE F_0 |
|----|--------------------------------|-------|----------------------|-------------------------------------|-------------------|
| 1 | HOSPITAL DEPARTAMENTAL NOCHE 1 | 1E | 3 | 2.0 | 3.3 |
| | | 2E | 9 | 3.4 | |
| | | 3E | 4 | 2.5 | |
| | | 4E | 5 | 6.3 | |
| | | 5E | 7 | 2.1 | |
| | | 6E | 4 | 3.5 | |
| | HOSPITAL DEPARTAMENTAL NOCHE 2 | 1E | 6 | 3.7 | 4.7 |
| | | 2E | - | - | |
| | | 3E | 6 | 16.3 | |
| | | 4E | 3 | 5.7 | |
| 5E | | 6 | 12.2 | | |
| 2 | ESTADIO LIBERTAD | 1E | 1 | 4.4 | 9.1 |
| | | 2E | 9 | 5.8 | |
| | | 3E | 4 | 17.2 | |
| 3 | BARRIO LA PAZ | 1E | 9 | 3.7 | 3.2 |
| | | 2E | 7 | 3.2 | |
| | | 3E | 2 | 2.7 | |
| 4 | BARRIO PANDIACO | 1E | 4 | 4.1 | 3.3 |
| | | 2E | 1 | 2.7 | |
| | | 3E | 6 | 3.2 | |
| 5 | PARQUE INFANTIL | 1E | - | - | 3.6 |
| | | 2E | 2 | 4.3 | |
| | | 3E | 5 | 8.7 | |
| | | 4E | 3 | 3.4 | |
| | | 5E | 2 | 3.1 | |
| 6 | SECTOR DOS PUENTES | 1E | 3 | 3.3 | 3.9 |
| | | 2E | 6 | 4.4 | |
| 7 | PLAZA DEL CARNAVAL | 1E | 8 | 15.0 | 12.5 |
| | | 2E | 5 | 10.0 | |
| | | 3E | 7 | 3.9 | |
| 8 | SECTOR POTRERILLO | 1E | - | - | 6.8 |
| | | 2E | 4 | 5.7 | |
| | | 3E | 7 | 3.2 | |
| | | 1G | 13 | 11.6 | |
| 9 | BARRIO EL TEJAR | 1E | 6 | 4.6 | 5.1 |
| | | 2E | 2 | 7.1 | |
| | | 3E | 5 | 5.7 | |
| | | 4E | 8 | 3.2 | |
| 10 | UDENAR FAC. ING. ZONA VERDE | 1E | 2 | 2.3 | 2.2 |
| | | 2E | 10 | 2.1 | |
| | | 3E | 6 | 2.1 | |
| 11 | TORRES VALLE DE ATRIZ | 1E | 2 | 22.6 | 3.2 |
| | | 2E | 3 | 3.4 | |
| | | 3E | 7 | 3.0 | |
| 12 | COLEGIO BETHLEMITAS | 1E | 3 | 3.2 | 4.2 |
| | | 2E | 2 | 3.6 | |
| | | 3E | 2 | 3.5 | |
| | | 1G | 46 | 6.7 | |
| 13 | EMPOPASTO CENTENARIO | 1E | 4 | 8.6 | 2.4 |
| | | 2E | 3 | 3.8 | |
| | | 3E | 2 | 3.3 | |
| | | 1G | - | - | |
| 14 | EMPOPASTO SAN FELIPE | 1E | 4 | 3.9 | 4.6 |
| | | 2E | 4 | 5.7 | |
| | | 1G | 12 | 4.2 | |

Tabla 6.25. Amplitudes resultantes de las mediciones de Nakamura.

| | SITIO | SEÑAL | VENTANA SELECCIONADA | AMPLITUD DE F ₀ PARA CADA VENTANA | AMPLITUD DE F ₀ |
|----|---|-------|----------------------|--|----------------------------|
| 15 | COLEGIO INEM | 1DE | - | | 3.1 |
| | | 2DE | 3 | 3.0 | |
| | | 1NE | 1 | 3.8 | |
| | | 2NE | 4 | 2.4 | |
| | | 1G | 2 | 18.5 | |
| 16 | COLEGIO SAN FRANCISCO JAVIER - PRIMARIA | 1E | 4 | 3.5 | 13.6 |
| | | 2E | 5 | 11.3 | |
| | | 1NE | 14 | 10.5 | |
| | | 2NE | 15 | 19.1 | |
| | | 1G | 11 | 1.6 | |
| 17 | SECTOR MORASURCO | 1E | 1 | 3.3 | 3.6 |
| | | 2E | 1 | 3.7 | |
| | | 3E | 4 | 4.8 | |
| | | 4E | 3 | 2.8 | |
| | | 1G | - | | |
| 18 | BARRIO NUEVA ARANDA | 1E | 7 | 2.7 | 2.8 |
| | | 2E | 7 | 2.3 | |
| | | 3E | 6 | 3.3 | |
| | | 4E | 2 | 2.4 | |
| | | 5E | 4 | 3.1 | |
| 19 | LOTE COLEGIO NUEVO JAVERIANO | 1E | 5 | 3.0 | 3.2 |
| | | 2E | 2 | 2.8 | |
| | | 1G | 1 | 3.9 | |
| 20 | SENA | 1E | 1 | 2.8 | 3.5 |
| | | 2E | 3 | 3.1 | |
| | | 3E | 2 | 3.5 | |
| | | 4E | 2 | 4.7 | |
| 21 | UDENAR FACARTES | 1E | 1 | 5.8 | 4.4 |
| | | 2E | 1 | 2.4 | |
| | | 3E | - | | |
| | | 4E | 1 | 3.5 | |
| | | 1G | 8 | 5.9 | |
| 22 | BARRIO AQUINE | 1E | 1 | 2.9 | 2.7 |
| | | 2E | 3 | 2.6 | |
| | | 3E | 1 | 2.6 | |
| 23 | COLEGIO LIBERTAD | 1E | - | | 1.7 |
| | | 2E | - | | |
| | | 3E | 8 | 1.8 | |
| | | 4E | 4 | 1.6 | |

N : NOCTURNA
D : DIURNA
G : GURALP CMG - 40T
E : ACELEROGRAFO ETNA

Tabla 6.25. Amplitudes resultantes de las mediciones de Nakamura (continuación).

6.6 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

6.6.1 Factor de amplificación. La revisión del “estado del arte del estudio de las microtrepidaciones” y los resultados obtenidos muestran un claro desacuerdo con respecto a la utilidad de la amplitud y los espectros H/V, en general, y la del pico fundamental en particular.

En este trabajo se encontró que el procesamiento de las señales influye en los valores de las amplitudes. Estas son afectadas por el suavizado de la señal y por el suavizado de los espectros. En el primero, cuando se utilizan ventanas con menor número de muestras se obtienen amplitudes menores y viceversa. En el segundo, al hacer un promedio de una amplitud con las vecinas, los valores muy altos se disminuyen drásticamente.

Aún cuando el número de mediciones ejecutadas no permite ser concluyente, las amplitudes mostraron una tendencia a valores mayores en mediciones nocturnas y menores en diurnas, aunque en general todas las amplitudes presentan valores similares sin diferenciar la hora de medición.

Safak (1991) y Giraldo (1999) anotan la importancia del tratamiento aplicado a las señales. En este contexto y por la sensibilidad de la amplitud a los diferentes tratamientos utilizados y al nivel de ruido durante las mediciones – más no del periodo – los resultados obtenidos corroboran lo encontrado por diversos autores: la relación de amplitudes de depósitos inconsolidados con respecto a roca o suelos muy rígidos no se entiende todavía.

Mientras que los valores de todos los puntos de medición son similares, el sector del Colegio San Francisco Javier – Primaria y Plaza del Carnaval presentaron los mayores valores y Colegio Libertad el mínimo, lo que no es comparable con las frecuencias en cada uno de los sitios como puede observarse en la Tabla 6.26.

| | SITIO | AMPLITUD DE F_0 | RELATIVA A COLEGIO LIBERTAD |
|----|---|-------------------|-----------------------------|
| 1 | HOSPITAL DEPARTAMENTAL NOCHE 1 | 3.3 | 1.94 |
| | HOSPITAL DEPARTAMENTAL NOCHE 2 | 4.7 | 2.76 |
| 2 | ESTADIO LIBERTAD | 9.1 | 5.35 |
| 3 | BARRIO LA PAZ | 3.2 | 1.88 |
| 4 | BARRIO PANDIACO | 3.3 | 1.94 |
| 5 | PARQUE INFANTIL | 3.6 | 2.12 |
| 6 | SECTOR DOS PUENTES | 3.9 | 2.29 |
| 7 | PLAZA DEL CARNAVAL | 12.5 | 7.35 |
| 8 | SECTOR POTRERILLO | 6.8 | 4.00 |
| 9 | BARRIO EL TEJAR | 5.1 | 3.00 |
| 10 | UDENAR FAC. ING. ZONA VERDE | 2.2 | 1.29 |
| 11 | TORRES VALLE DE ATRIZ | 3.2 | 1.88 |
| 12 | COLEGIO BETHLEMITAS | 4.2 | 2.47 |
| 13 | EMPOPASTO CENTENARIO | 2.4 | 1.41 |
| 14 | EMPOPASTO SAN FELIPE | 4.6 | 2.71 |
| 15 | COLEGIO INEM | 3.1 | 1.82 |
| 16 | COLEGIO SAN FRANCISCO JAVIER - PRIMARIA | 13.6 | 8.00 |
| 17 | SECTOR MORASURCO | 3.6 | 2.12 |
| 18 | BARRIO NUEVA ARANDA | 2.8 | 1.65 |
| 19 | LOTE COLEGIO NUEVO JAVERIANO | 3.2 | 1.88 |
| 20 | SENA | 3.5 | 2.06 |
| 21 | UDENAR FACARTES | 4.4 | 2.59 |
| 22 | BARRIO AQUINE | 2.7 | 1.59 |
| 23 | COLEGIO LIBERTAD | 1.7 | 1.00 |

Tabla 6.26. Tabla de amplitudes de f_0 con respecto al sitio Colegio Libertad.

6.6.2 Periodos fundamentales. En los sectores de estudio los periodos picos predominantes oscilan entre (0,4 – 1,8) segundos con un rango entre 0,03 y 4,40.

Los puntos de medición en el Hospital Departamental están distanciados 200 metros aproximadamente y estos presentan rangos y picos fundamentales muy similares con una diferencia de amplitudes de f_0 menor a 1.

En el Estadio Libertad se observan periodos en el rango (1,22 – 1,57) seg, con amplitudes de $f_0 = 5,35$. Con respecto al sector del Colegio Libertad en el cual se observan periodos dentro del rango (0,12 – 0,13) seg, con amplitudes de $f_0 = 1$, se anota que aunque el Colegio Esta ubicado sobre ladera, los periodos y amplitudes de f_0 son menores a las del Estadio Libertad, punto ubicado en valle, a causa probablemente de las acentuadas diferencias en su perfil estratigráfico.

Para el sector del Colegio Libertad de acuerdo a la ecuación A.4-2 de la NSR-98, a partir del rango de periodos para el sector y $C_t = 0,08$, las estructuras de $h_n \cong 2,00$ metros tienen un periodo de vibración similar al periodo fundamental de vibración de los suelos en este sector. Ver un resumen de estos resultados en la Tabla 6.27.

Para el sector de la Universidad de Nariño Facultad de Ingeniería se observan periodos del orden 0,06 segundos y amplitudes de $f_0 = 1,29$ A partir de estos datos, las estructuras de $h_n \cong 1,00$ metros tienen un periodo de vibración similar al periodo fundamental de vibración de los suelos en este sector.

En el sector de la Universidad de Nariño Facultad de Artes, punto distanciado 600 metros aproximadamente de la Facultad de Ingeniería se observan periodos dentro del rango (0.15 – 0.22) seg, y amplitudes de $f_0 = 2.59$ Como se puede apreciar respecto al punto anterior las frecuencias y amplitudes aumentan a causa de las diferencias en los perfiles estratigráficos en cada sector en análisis (punto de registro). A partir de estos datos, las estructuras de $h_n \cong (2 - 4)$ metros tienen un periodo de vibración similar al periodo fundamental de vibración de los suelos en este sector.

En general las frecuencias predominantes son similares en los sectores de medición, observando los máximos valores en sectores como la Universidad de Nariño – Facultad de Ingeniería, Morasurco, Nueva Aranda, Lote Nuevo Javeriano, SENA y Barrio Aquine, con respecto a las amplitudes de f_0 los valores máximos se aprecian en sectores como la Plaza del Carnaval y el Colegio San Francisco Javier Primaria.

Las menores frecuencias se aprecian en sectores como el Colegio San Francisco Javier Primaria, Colegio INEM, y la Plaza del Carnaval, y las menores amplitudes de f_0 en sectores como el Colegio Libertad y la Universidad de Nariño – Facultad de Ingeniería.

En general se conoce que los periodos largos o frecuencias bajas indican depósitos profundos mientras que los depósitos superficiales blandos y delgados correlacionan con frecuencias altas o periodos cortos (p. ej. Toral *et al*, 1997). La interpretación de los resultados de los periodos de vibración medidos está necesariamente ligada con los factores geotécnicos, la consolidación de los depósitos y su espesor.

| | SITIO | RANGO DE FRECUENCIA (F_0 Hz) | | RANGO DE PERIODOS (T_0 Seg) | | h_n (metros) | |
|----|---|---------------------------------|-------|--------------------------------|-------|----------------|-------|
| | | F min | F max | T max | T min | h máx | h mín |
| | | | | | | | |
| 1 | HOSPITAL DEPARTAMENTAL NOCHE 1 | 0.54 | 0.82 | 1.85 | 1.22 | 66 | 38 |
| | HOSPITAL DEPARTAMENTAL NOCHE 2 | 0.54 | 0.88 | 1.85 | 1.14 | 66 | 34 |
| 2 | ESTADIO LIBERTAD | 0.64 | 0.82 | 1.56 | 1.22 | 53 | 38 |
| 3 | BARRIO LA PAZ | 0.82 | 1.03 | 1.22 | 0.97 | 38 | 28 |
| 4 | BARRIO PANDIACO | 2.43 | 3.13 | 0.41 | 0.32 | 9 | 6 |
| 5 | PARQUE INFANTIL | 0.72 | 1.81 | 1.39 | 0.55 | 45 | 13 |
| 6 | SECTOR DOS PUENTES | 0.81 | 0.81 | 1.23 | 1.23 | 38 | 38 |
| 7 | PLAZA DEL CARNAVAL | 0.35 | 0.37 | 2.86 | 2.70 | 118 | 109 |
| 8 | SECTOR POTRERILLO | 0.57 | 0.64 | 1.75 | 1.56 | 61 | 53 |
| 9 | BARRIO EL TEJAR | 0.64 | 0.72 | 1.56 | 1.39 | 53 | 45 |
| 10 | UDENAR FAC. ING. ZONA VERDE | 17.3 | 18.17 | 0.06 | 0.06 | 1 | 1 |
| 11 | TORRES VALLE DE ATRIZ | 0.62 | 0.89 | 1.61 | 1.12 | 55 | 34 |
| 12 | COLEGIO BETHLEMITAS | 1.82 | 2.55 | 0.55 | 0.39 | 13 | 8 |
| 13 | EMPOPASTO CENTENARIO | 1.39 | 1.85 | 0.72 | 0.54 | 19 | 13 |
| 14 | EMPOPASTO SAN FELIPE | 0.45 | 0.86 | 2.22 | 1.16 | 84 | 35 |
| 15 | COLEGIO INEM | 0.27 | 0.89 | 3.70 | 1.12 | 166 | 34 |
| 16 | COLEGIO SAN FRANCISCO JAVIER - PRIMARIA | 0.23 | 0.95 | 4.35 | 1.05 | 206 | 31 |
| 17 | SECTOR MORASURCO | 15.14 | 16.61 | 0.07 | 0.06 | 1 | 1 |
| 18 | BARRIO NUEVA ARANDA | 17.66 | 24.13 | 0.06 | 0.04 | 1 | 0.4 |
| 19 | LOTE COLEGIO NUEVO JAVERIANO | 28.19 | 34.23 | 0.04 | 0.03 | 0.3 | 0.3 |
| 20 | SENA | 26.08 | 28.04 | 0.04 | 0.04 | 0.4 | 0.3 |
| 21 | UDENAR FACARTES | 4.61 | 6.59 | 0.22 | 0.15 | 4 | 2 |
| 22 | BARRIO AQUINE | 25.02 | 25.87 | 0.04 | 0.04 | 0.4 | 0.4 |
| 23 | COLEGIO LIBERTAD | 7.95 | 8.17 | 0.13 | 0.12 | 2 | 2 |

Tabla 6.27. Tabla de resumen valores de h_n a partir de A.4.2 – NSR 98.

En la Figura 6.16 se aprecia la distribución de los periodos de vibración de los suelos resultantes de la aplicación de la metodología de Nakamura.

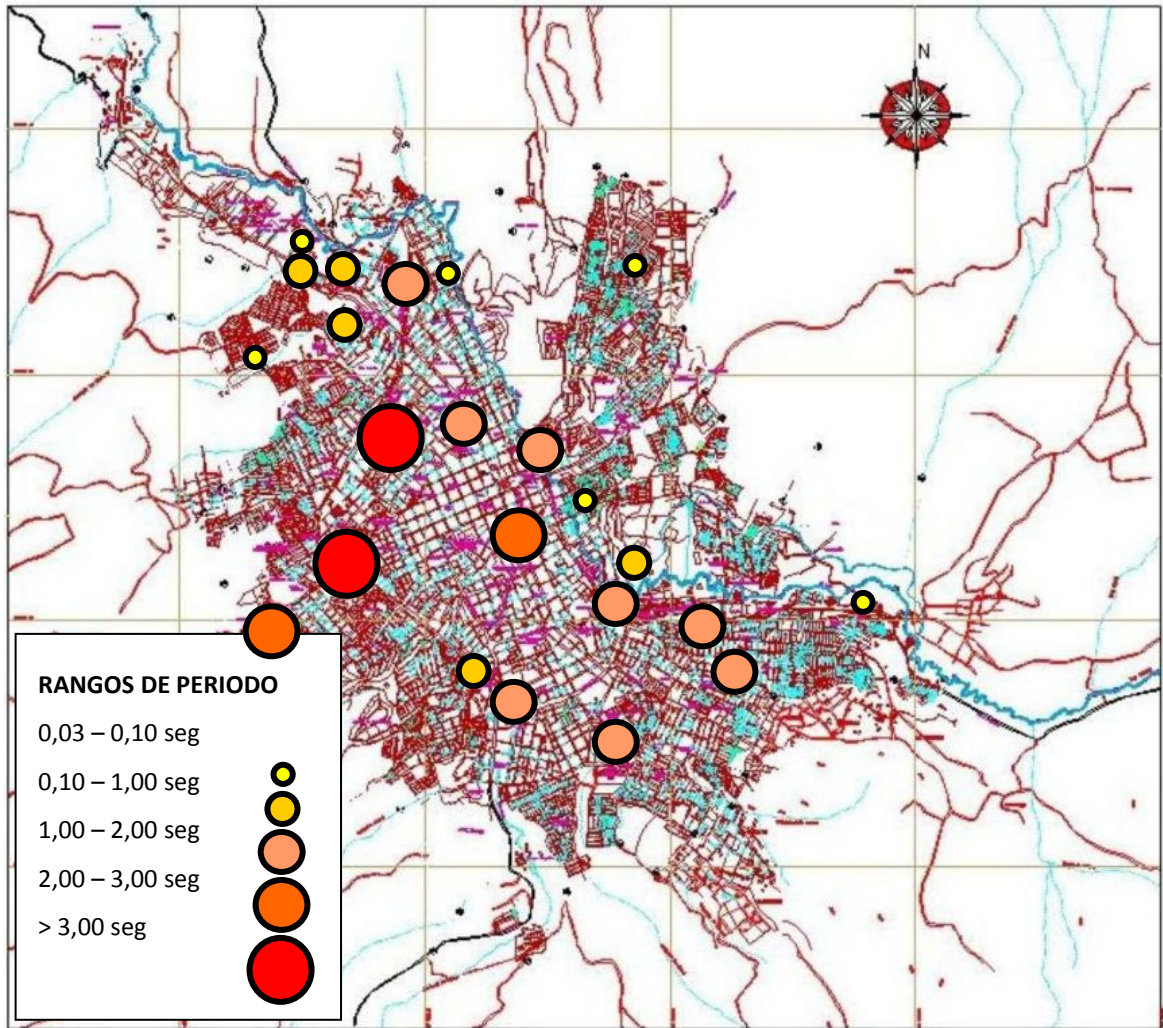


Figura 6.16. Distribución de los periodos resultantes.

7 APLICACIÓN MÉTODO NUMÉRICO (ProShake)

7.1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA²⁵

El programa se fundamenta en el “Modelo Lineal Equivalente”, es decir en la concepción teórica no lineal, que busca una equivalencia energética de disipación en el modelo lineal a través de un proceso de linealización, que consiste en ajustar los valores de G y D (Módulo de cizalla y factor de amortiguamiento respectivamente) de cada una de las capas del perfil estratigráfico analizado, para un nivel de deformación por corte media inducida en ésta por la excitación sísmica.

Las hipótesis sobre las cuales se sustenta son:

- Excitación armónica: Las ondas vienen dadas en forma discreta por valores de aceleración igualmente espaciados con un intervalo temporal de muestreo.
- Propagación: Se realiza en dirección vertical considerando las ondas de cizalla, únicamente provenientes de la formación rocosa subyacente, lo que implica que sólo se considera el movimiento de las partículas del suelo en la dirección horizontal.
- Sistema de capas:
 - Planas y paralelas de extensión horizontal infinita, existiendo únicamente como variable espacial la profundidad z.
 - Caracterizadas por: Espesor h, densidad ρ , módulo de cizalla G y factor de amortiguamiento D.
 - Semiespacio de profundidad infinita.
 - Medio homogéneo e isotrópico.

El método Shake (Schnabel et al., 1972) considera la respuesta asociada a la propagación vertical de ondas de cizalla a través del sistema viscoelástico lineal que se muestra en la figura 7.1.

En la figura 7.2, se puede observar una representación esquemática del funcionamiento del programa ProShake.

²⁵ CORAL MONCAYO, Hugo. Utilización de métodos experimentales y de simulación numérica para la microzonificación sísmica de áreas urbanizadas en Andorra. Barcelona, 2002. p. 86. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. E. T. S. Ingenieros de Caminos, C. y P. Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica

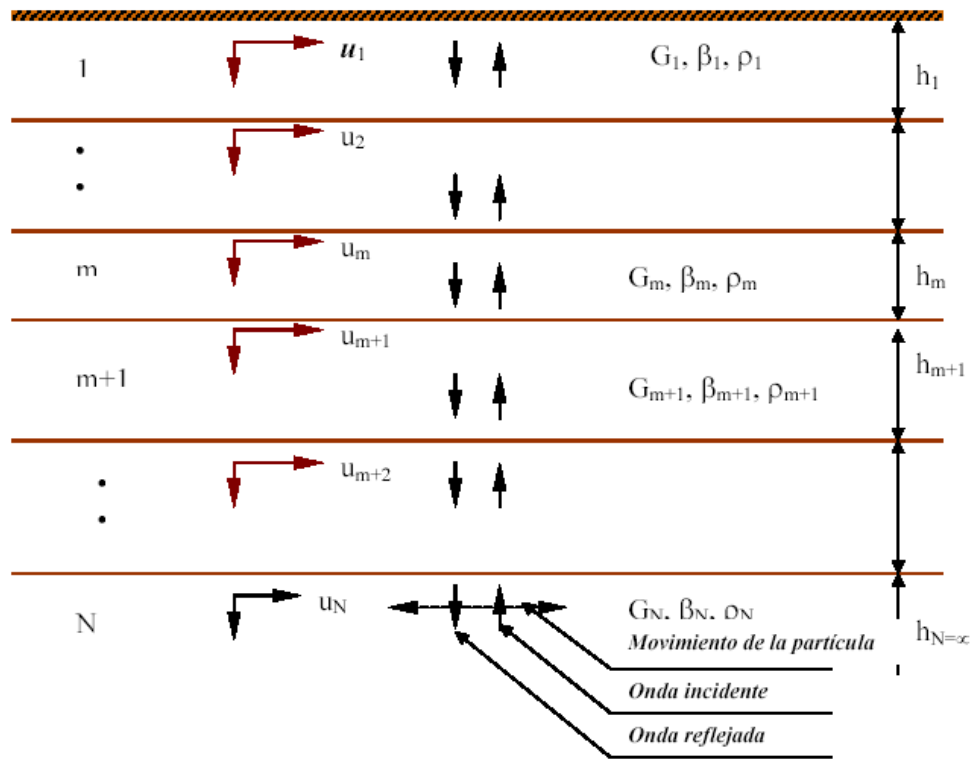


Figura 7.1. Propagación vertical de ondas de cizalla de un medio unidimensional semi-infinito estratificado en capas planas. (Coral, 2002).

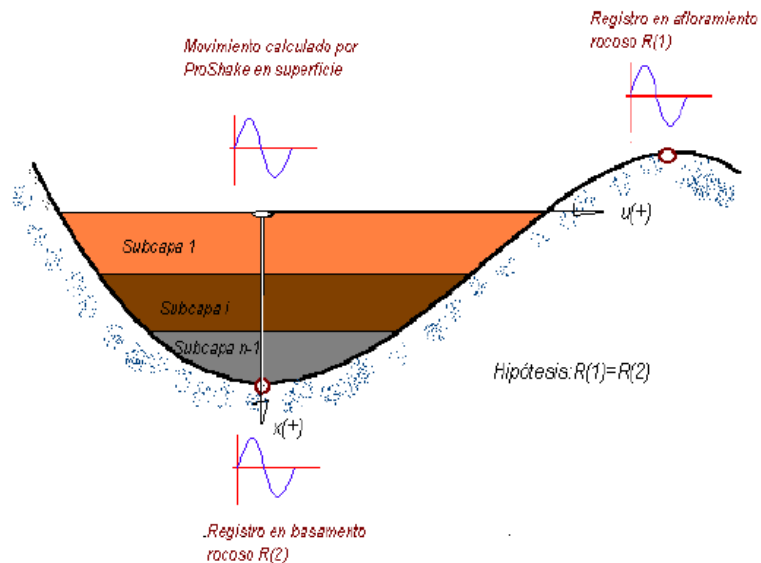


Figura 7.2. Representación esquemática del funcionamiento del programa ProShake. (Coral, 2002).

Para una mejor visualización del funcionamiento del programa ProShake, se muestra en la figura 7.3 el diagrama de flujo donde se indica su procedimiento.

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA PROSHAKE

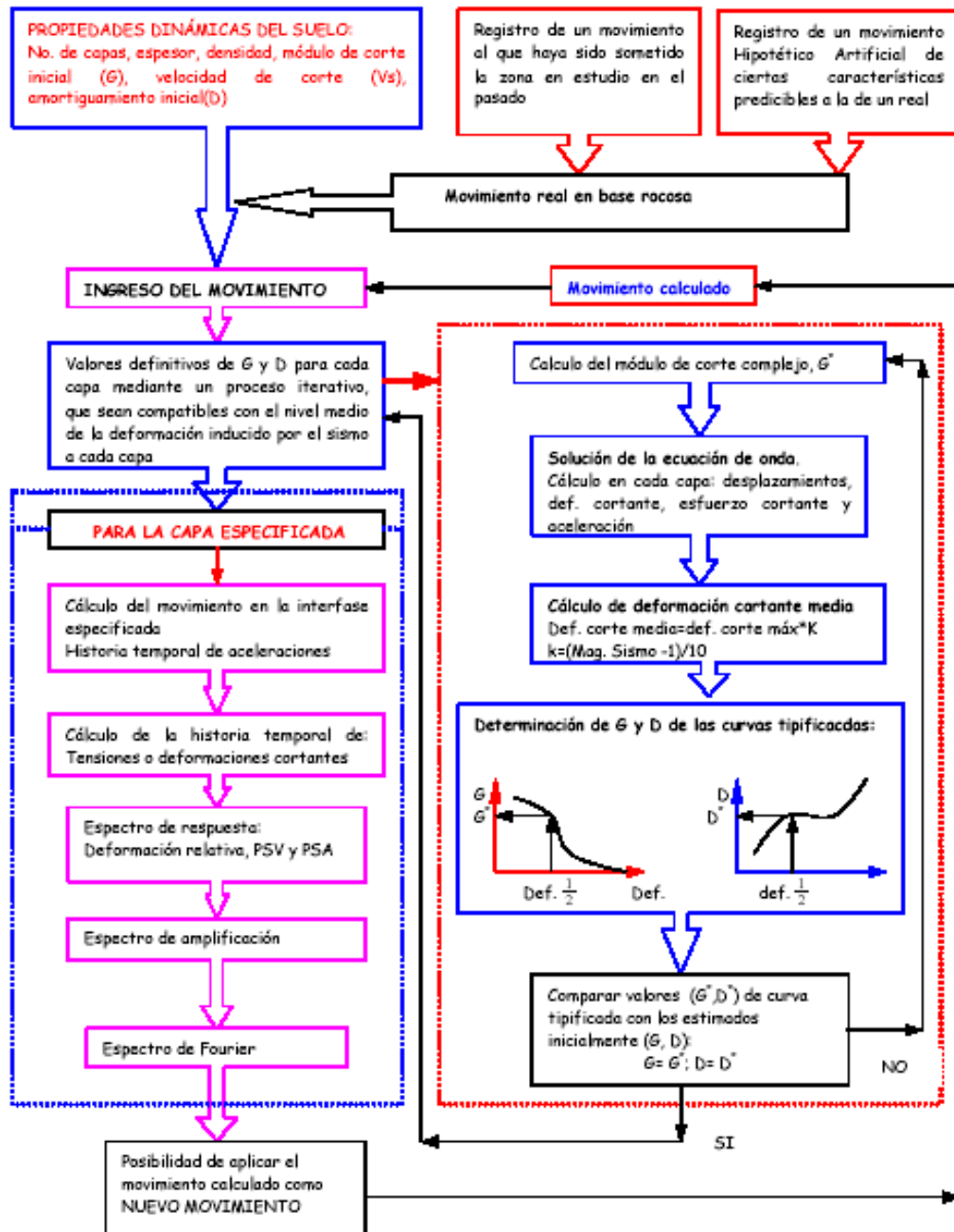


Figura 7.3. Diagrama de flujo donde se muestra el funcionamiento del programa ProShake (Coral, 2002).

7.2. ESTRUCTURA DEL PROGRAMA

El programa ProShake está diseñado para proporcionar una interfase que simplifica y agiliza el proceso de representación e interpretación de los resultados del análisis de respuesta del suelo. El programa está organizado en tres “Managers” con una secuencia

de operaciones como se muestra en la figura 7.4, el “Report” puede estar asociado al “Input Manager” y al “Output Manager”.

La estructura del programa está diseñada para permitir una completa flexibilidad. Por ejemplo, los usuarios pueden saltarse una secuencia e ir directamente al “Output Manager” para un análisis previo de los resultados.



Figura 7.4. Organización del programa ProShake (Coral, 2002)

Las funciones básicas de los tres “Managers” y “Report” se describen a continuación.

✓ **Input Manager:**

Se usa para definir el perfil de suelo con sus propiedades dinámicas y todos los movimientos de entrada.

El perfil de suelo se ingresa haciendo clic en el cajón “Profile” del “Input Manager”. La información que se escribe es: título del perfil, número de capas, profundidad del nivel freático; para cada capa se introduce: el material, espesores, peso unitario, máximo esfuerzo cortante o velocidad de ondas de corte, curvas de reducción de módulos y curvas de amortiguamiento. Se obtiene una ventana como la que se muestra en la figura 7.5.

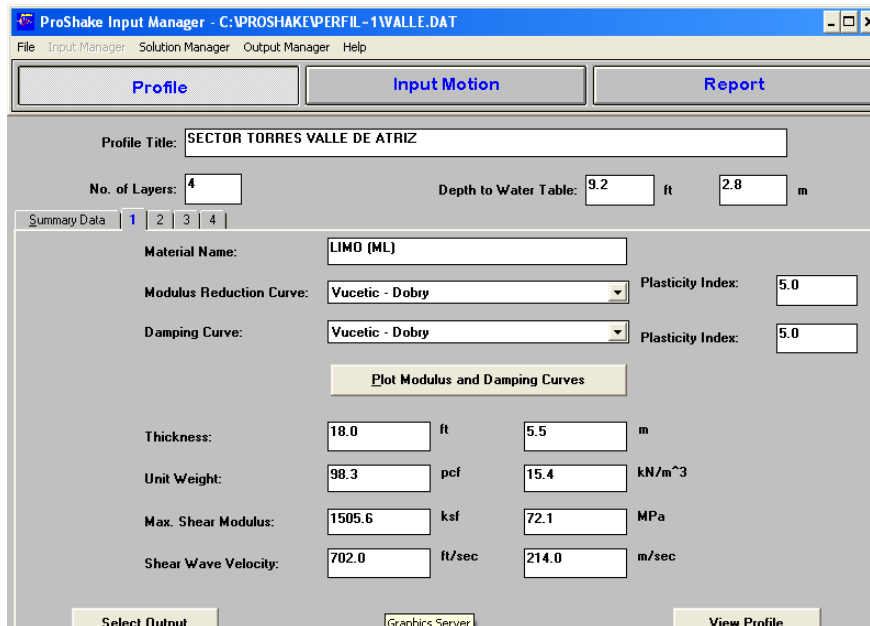


Figura 7.5. Ventana de ingreso de datos del perfil de suelo

Se puede obtener un resumen del perfil de suelo haciendo clic en “Summary Data” como se muestra en la ventana de la figura 7.6.

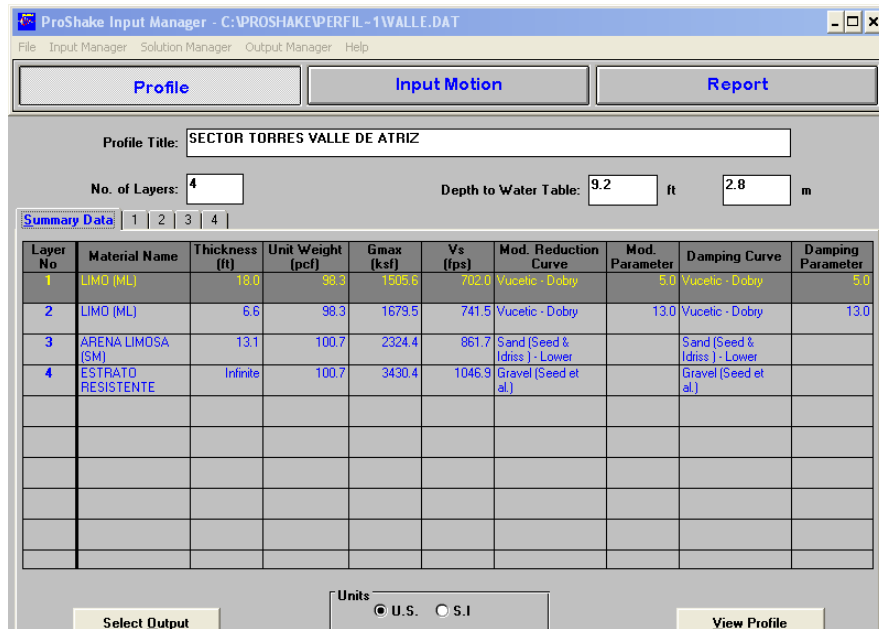


Figura 7.6. Ventana de resumen de la información de entrada

El programa ProShake, al ingresar los datos del perfil del suelo y movimientos genera un gráfico que se puede observar en el “Report” con los parámetros asignados para cada uno de los materiales. Esta información es muy usual para detectar errores o problemas en el ingreso de datos. El gráfico de los parámetros se observa en la figura 7.7.

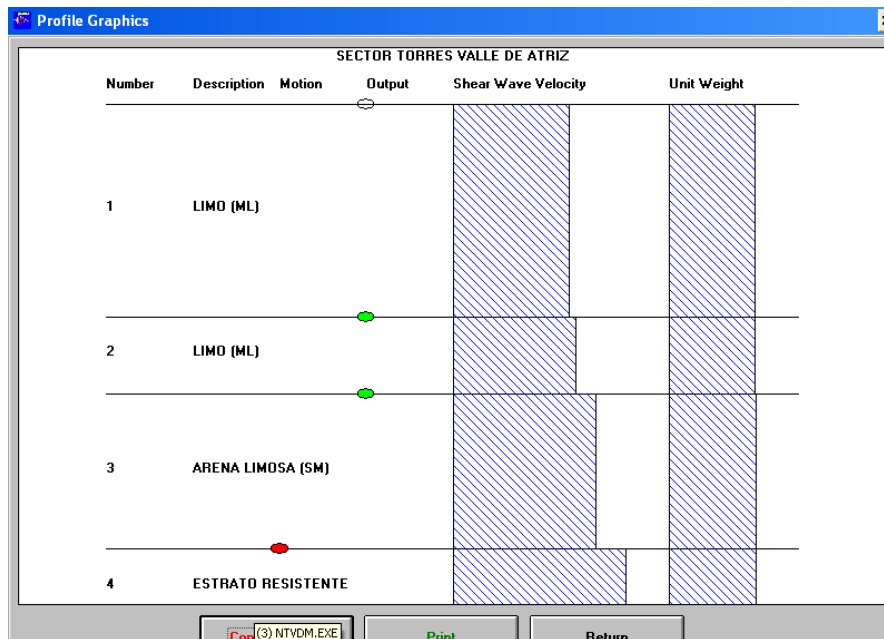


Figura 7.7. Ventana del perfil de suelo y sus características y solicitudes de resultados.

✓ Input Motion

El programa ProShake permite observar los diferentes movimientos de interés con sus propiedades, para seleccionar entre ellos los más apropiados en el análisis.

El número de movimientos no está limitado, está sujeto a la capacidad de memoria del computador, entendiendo que las señales sísmicas normalmente son grandes.

Una ventana de la información de los movimientos de entrada en roca se muestra en la figura 7.8.

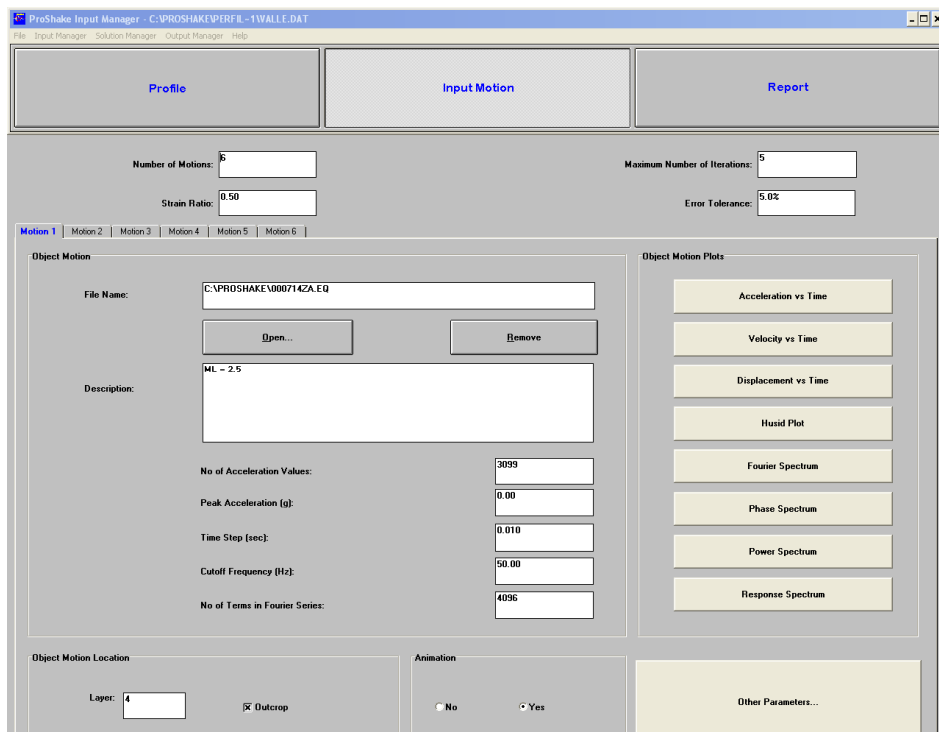


Figura 7.8. La ventana muestra las propiedades de las señales de entrada.

✓ Solution Manager

Esta instrucción sirve para ejecutar el análisis lineal equivalente del programa ProShake. La solución queda grabada en el “Output Manager”. Durante el proceso de la solución se muestran en pantalla tres gráficos para cada movimiento, el de la izquierda indica la variación del esfuerzo de corte efectivo en profundidad para cada iteración, el del centro y la derecha, ilustra la variación del error de los módulos y amortiguamiento repetidamente para cada iteración.

✓ Output Manager

Todos los resultados permiten ser mostrados gráficamente como: movimientos esfuerzo-deformación, espectro de respuesta y gráficos de su comportamiento en profundidad. El

“Output” también calcula otros parámetros como: aceleración pico, velocidad pico, desplazamiento pico, intensidad del espectro de respuesta, duración, entre otros.

A continuación se presentan algunos ejemplos:

✓ Gráficos de movimientos

En las ventanas de la figura 7.9 se presenta un ejemplo de la historia temporal de aceleraciones seleccionada en un cálculo.

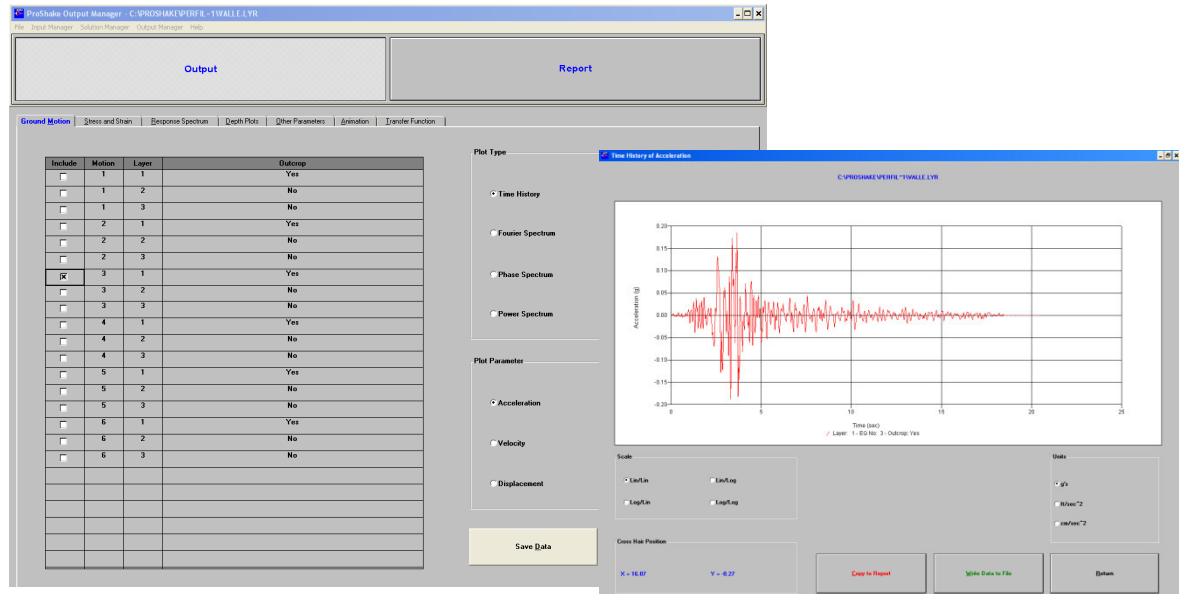


Figura 7.9. Historia de aceleraciones en superficie para un determinado estrato de suelo de uno de los perfiles analizados.

✓ Espectro de respuesta

El espectro de respuesta puede ser dibujado a diferentes escalas, seleccionando los cajones que se incluyen en la ventana. En la figura 7.10 se muestra un ejemplo.

✓ Funciones de transferencia

La función de transferencia describe la relación entre dos movimientos en el dominio frecuencial.

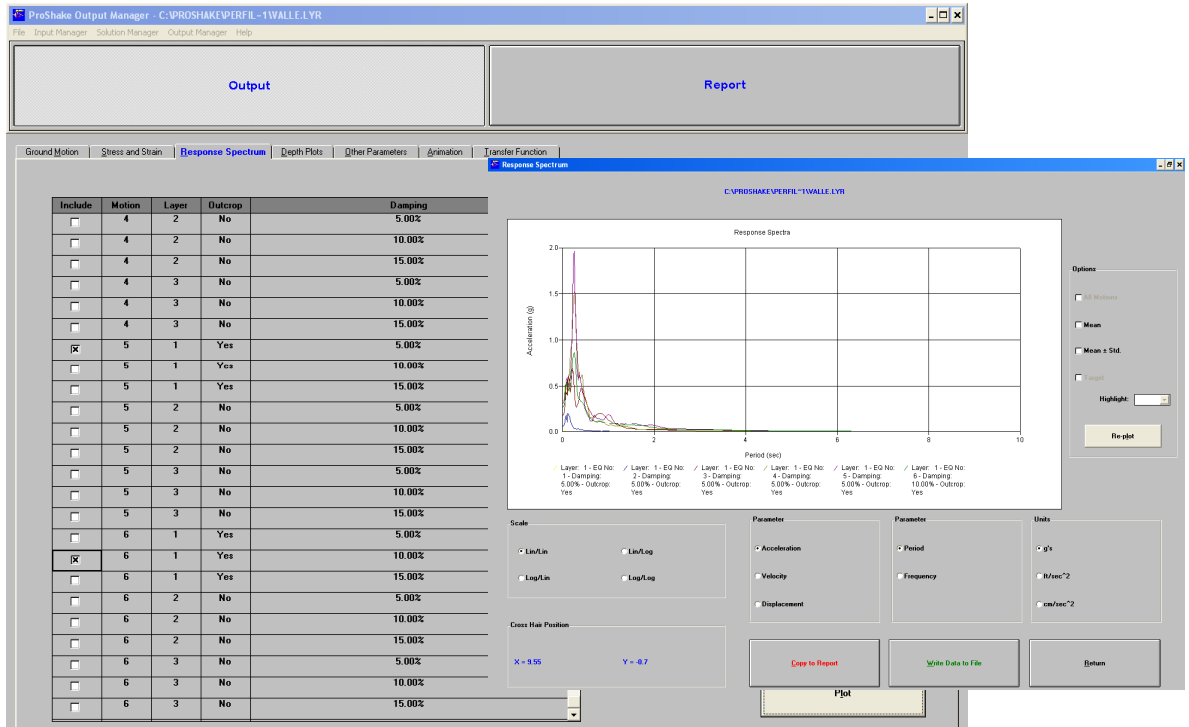


Figura 7.10. Se muestra un espectro de respuesta obtenido para un determinado estrato y amortiguamiento.

Considerando los dos movimientos **A** y **B** con series de Fourier **A(f)** y **B(f)**, respectivamente, la función de transferencia se describe como la relación: (Fig. 7.11).

$$H(f) = A(f) / B(f)$$

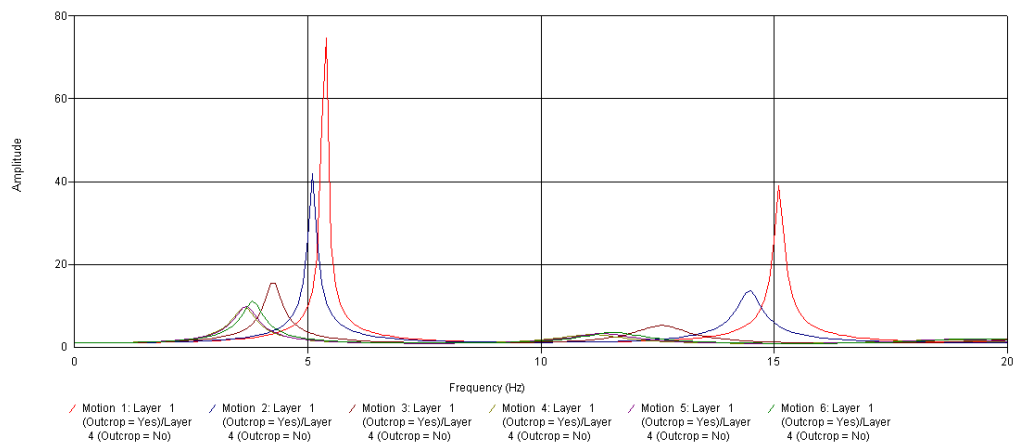


Figura 7.11. Función de transferencia suelo/roca para uno de los perfiles analizados.

7.3. CARACTERIZACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL SUELO EN LAS ZONAS DE ESTUDIO

Una vez caracterizados los 23 perfiles seleccionados de la zona en estudio con sus propiedades físico-mecánicas y dinámicas deducidas, se aplicó el programa ProShake.

Inicialmente se procedió a simular y estimar los efectos sísmicos locales en los sectores de estudio seleccionados usando como señal de entrada pulsos de Ricker de frecuencias predominantes 2, 5 y 7 Hz. Posteriormente se utilizan sismos de magnitud local 2.5, 4, 5, 6 y 6,8 tomados de la “European Strong Motion Database” (Ambraseys et al, 2002).

7.4. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA APLICACIÓN DEL PROGRAMA PROSHAKE CON PULSOS DE RICKER

Los pulsos tienen una duración de 2 segundos y una aceleración pico de 0.045 g (Ver la figura 7.12) y se definen con las ecuaciones (Coral, 2002):

$$F(t) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} (a - 0.5) e^{-a} \quad \text{con}$$

$$a = \left| \pi \left(\frac{t - t_s}{t_p} \right) \right|^2$$

donde,

tp: Periodo

ts: Tiempo para el cual se obtiene la máxima aceleración.

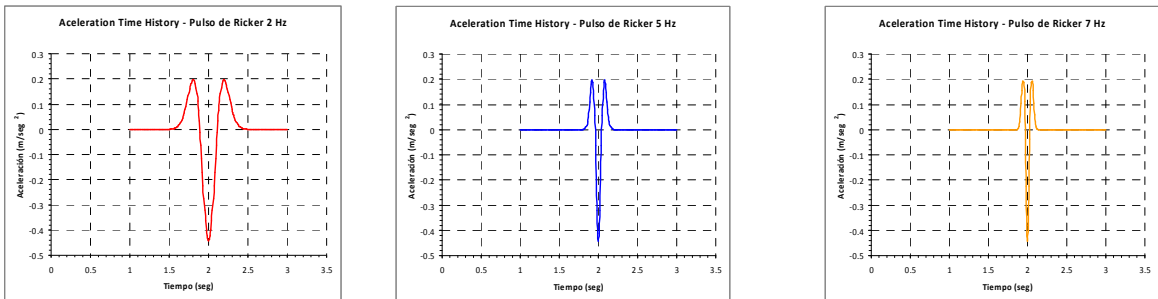


Figura 7.12. Pulsos de Ricker para los perfiles en estudio.

Dada la gran cantidad de información que reporta el programa, se procedió a seleccionar aquellos parámetros de interés para el presente estudio, y para tal efecto se seleccionaron:

- ✓ Reporte de los diferentes perfiles con sus características y el perfil de suelo con la información suministrada y solicitada. Se muestra un ejemplo en la tabla 7.1 y figura 7.13.

- ✓ Las curvas de módulos de corte normalizado y factor de amortiguamiento para cada material de cada uno de los perfiles, tal como se muestra en la figura 7.14.
- ✓ Un ejemplo de los registros de aceleraciones calculados en la parte superior de los estratos de diferentes perfiles, se indica en la figura 7.15 a 7.17 y los restantes en el anexo 1, en formato LYR. Como registro de entrada se han considerado pulsos de Ricker de 2 Hz (curva roja), 5 Hz (curva azul) y 7 Hz (curva verde).
- ✓ Un ejemplo de los espectros de respuesta en superficie y en roca de los diferentes perfiles se muestran en la figura 7.18 y 7.19.
- ✓ Un ejemplo de las funciones de transferencia en superficie y sitios de interés de los 23 perfiles se muestra en la figura 7.20.

Los resultados restantes se entregan en el anexo 1, en formato LYR.

ProShake Report

Data File: C:\PROSHAKE\PERFPULWALLE.DAT

Soil Profile

Profile Name: SECTOR TORRES VALLE DE ATRIZ
 Water Table: 9.19 ft
 Number of Layers: 4

| Layer Number | Material Name | Thickness (ft) | Unit Weight (pcf) | Gmax (ksf) | Vs (ft/sec) | Modulus Curve | Damping Curve | Mod. Parameter | Damp. Parameter |
|--------------|------------------|----------------|-------------------|------------|-------------|------------------------|--------------------------|----------------|-----------------|
| 1 | LIMO (ML) | 18.04 | 98.29 | 1,505.60 | 702.03 | Vucetic - Dobry | Vucetic - Dobry | 5.00 | 5.00 |
| 2 | LIMO (ML) | 6.56 | 98.29 | 1,679.50 | 741.47 | Vucetic - Dobry | Vucetic - Dobry | 13.00 | 13.00 |
| 3 | ARENA LIMOSA (S) | 13.12 | 100.71 | 2,324.40 | 861.75 | Sand (Seed & Idriss) - | Sand (Seed & Idriss) - L | | |
| 4 | ESTRATO RESIS | Infinite | 100.71 | 3,430.44 | 1,046.88 | Gravel (Seed et al.) | Gravel (Seed et al.) | | |

| | File Name | No of Acc. Values | Max. Acc. (g) | Time Step (sec) | Cutoff Freq. (Hz) | No of Fourier Terms | Layer | Outcrop | Layer No | Depth (ft) | Outcrop |
|-------------------------|--------------------|-------------------|---------------|-----------------|-------------------|---------------------|-------|---------|----------|------------|---------|
| | | | | | | | | | 1 | 0.00 | Yes |
| Number of Motions: 3 | | | | | | | | | 2 | 18.04 | No |
| Number of Iterations: 5 | C:\PROSHAKE\2HZ.EQ | 200 | 0.045 | 0.010 | 50.00 | 256 | 4 | Yes | 3 | 24.61 | No |
| Strain Ratio: 0.65 | C:\PROSHAKE\5HZ.EQ | 200 | 0.045 | 0.010 | 50.00 | 256 | 4 | Yes | | | |
| Tolerance: 5.00% | C:\PROSHAKE\7HZ.EQ | 200 | 0.045 | 0.010 | 50.00 | 256 | 4 | Yes | | | |

Tabla 7.1. Reporte del perfil sector Torres Valle de Atriz.

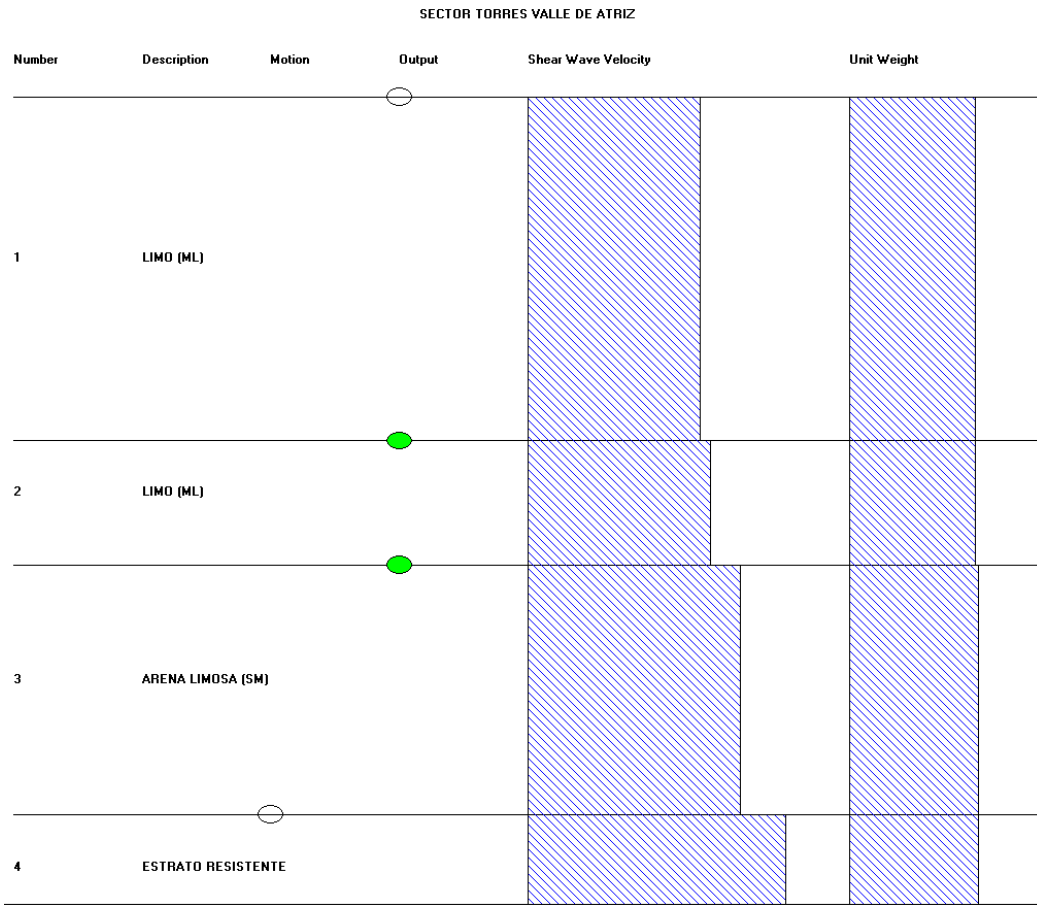


Figura 7.13. Perfil Sector Torres Valle de Atriz con la información suministrada y solicitada.

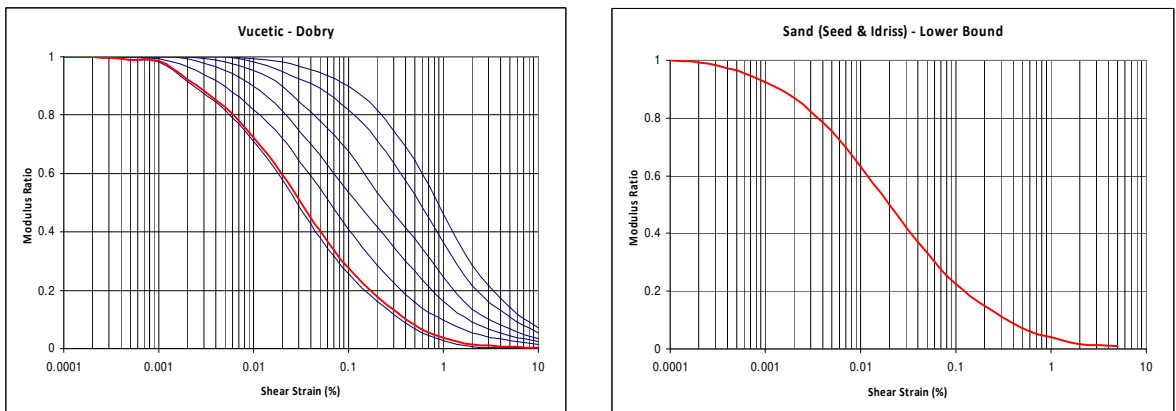


Figura 7.14. Gráficas de variación de módulos de cizalla y factores de amortiguamientos con la deformación considerados en los cálculos para los perfiles en estudio.

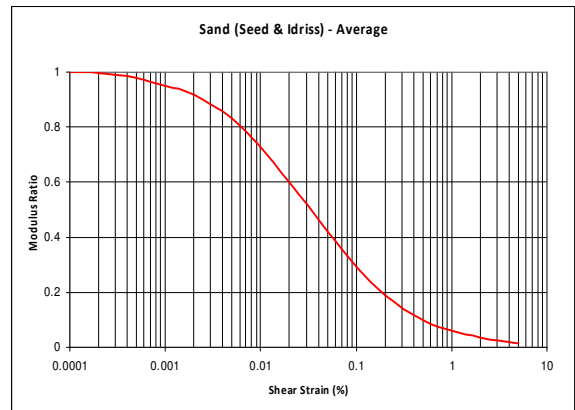
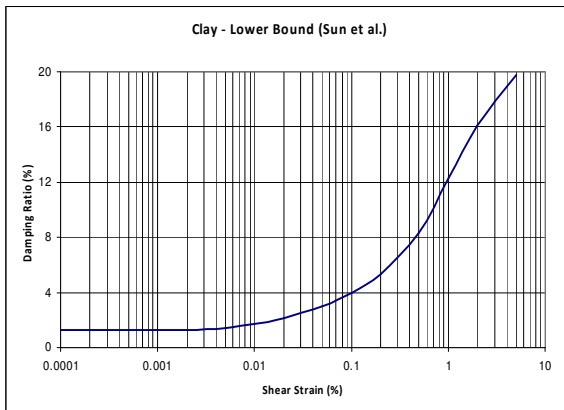
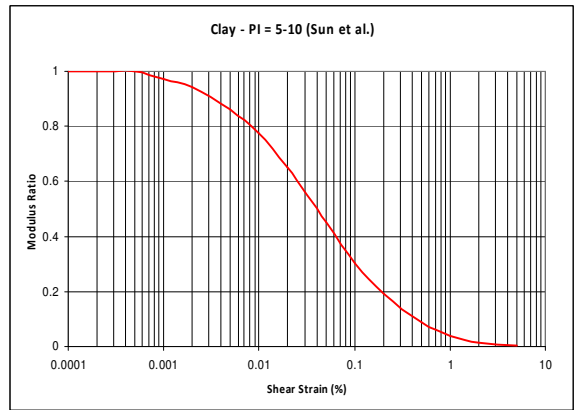
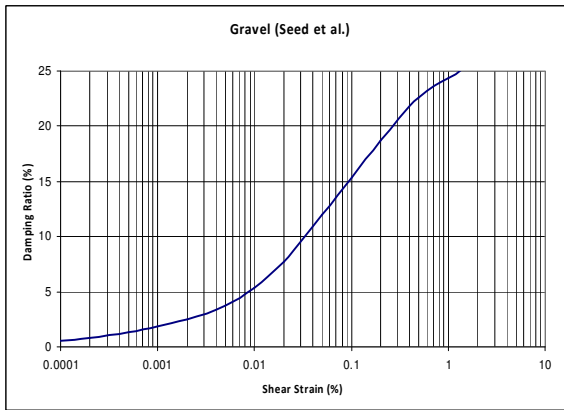
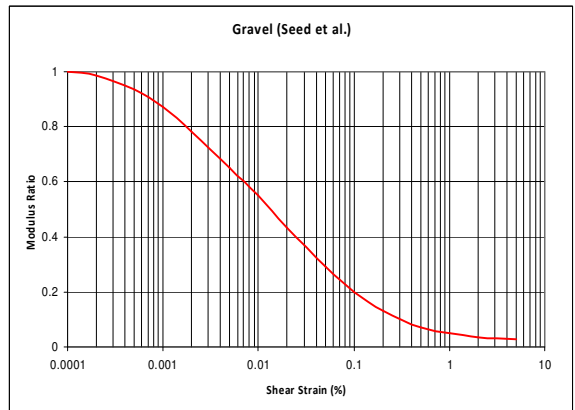
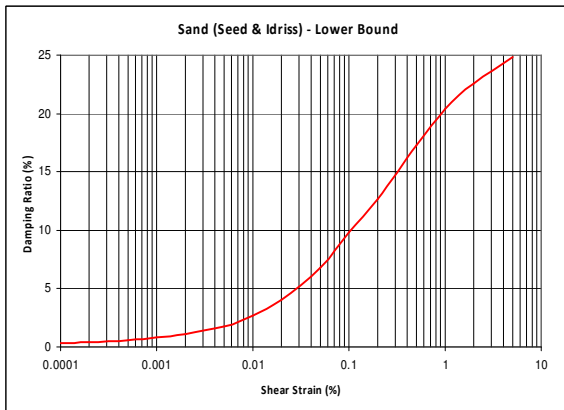


Figura 7.14 Gráficas de variación de módulos de cizalla y factores de amortiguamientos con la deformación considerados en los cálculos para los perfiles en estudio. (Continuación)

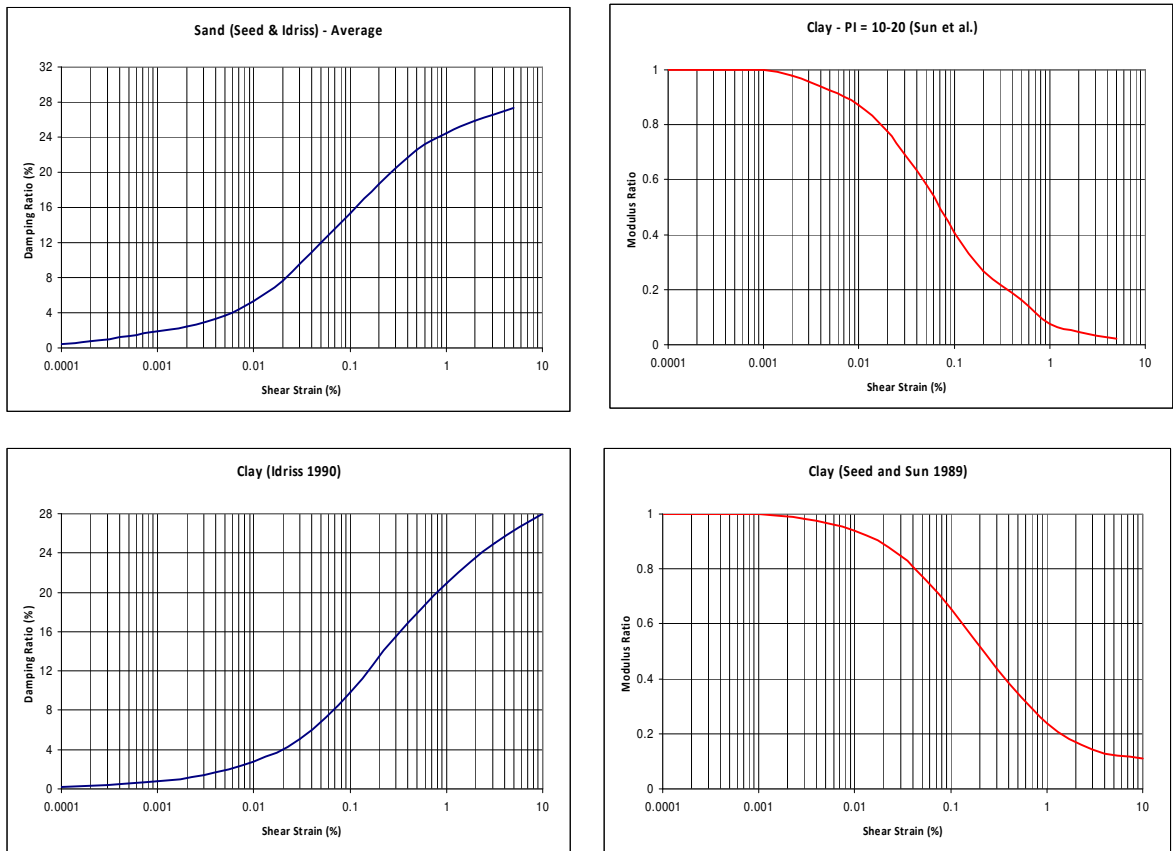


Figura 7.14 Gráficas de variación de módulos de cizalla y factores de amortiguamientos con la deformación considerados en los cálculos para los perfiles en estudio. (Continuación).

A continuación se detallan, en las figuras 7.15, 7.16 y 7.17, los registros obtenidos en cada capa del perfil del sector Torres valle de Atriz, considerando como registros de entrada en el estrato resistente²⁶, pulsos de Ricker de 2, 5 y 7 Hz.

²⁶ A partir del ensayo de penetración estándar presente en el resumen de los estudios geotécnicos seleccionado, se determinó como estrato resistente aquellos cuyos valores de N_{spt} son mayores a 45 golpes.

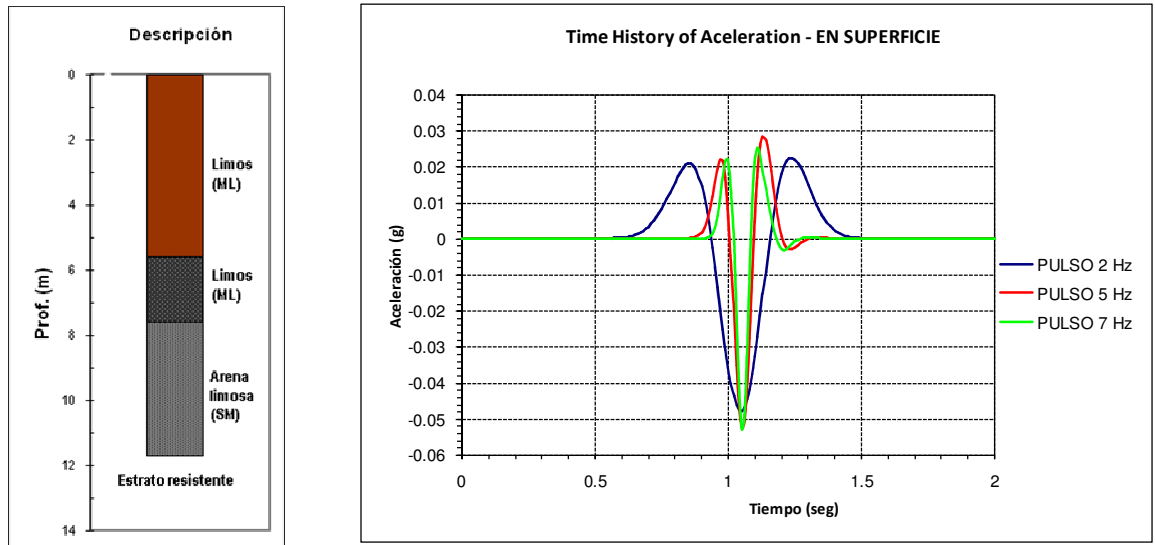


Figura 7.15. Registros de aceleración obtenidos en el limo (ML) a la profundidad de 0.0 mts a 5.5 mts del perfil sector Torres Valle de Atriz.

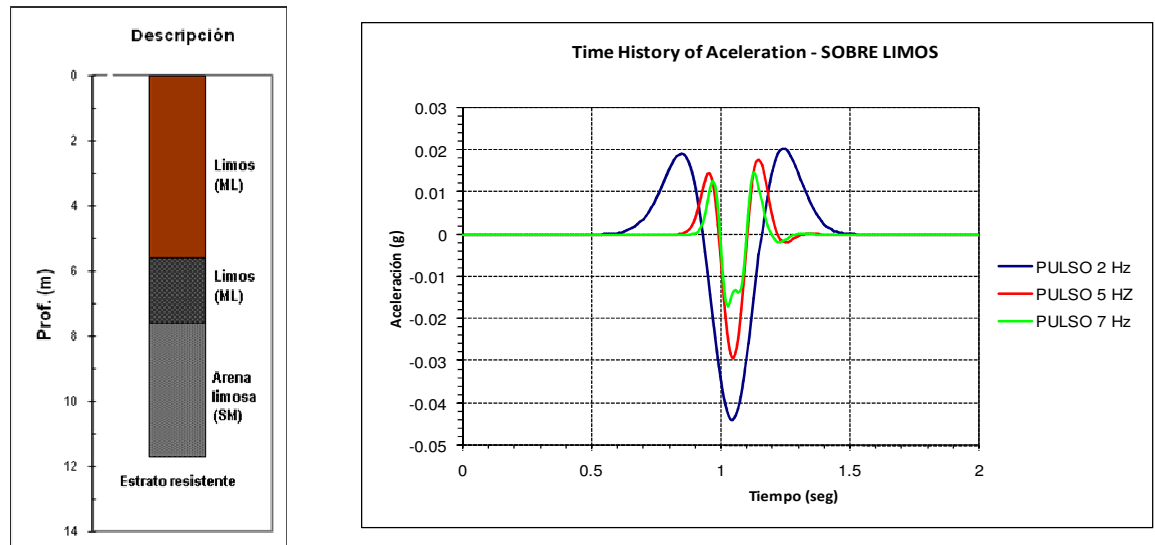


Figura 7.16. Registros de aceleración obtenidos en el limos (ML) a la profundidad de 5.5 mts a 7.5 mts, del perfil sector Torres Valle de Atriz.

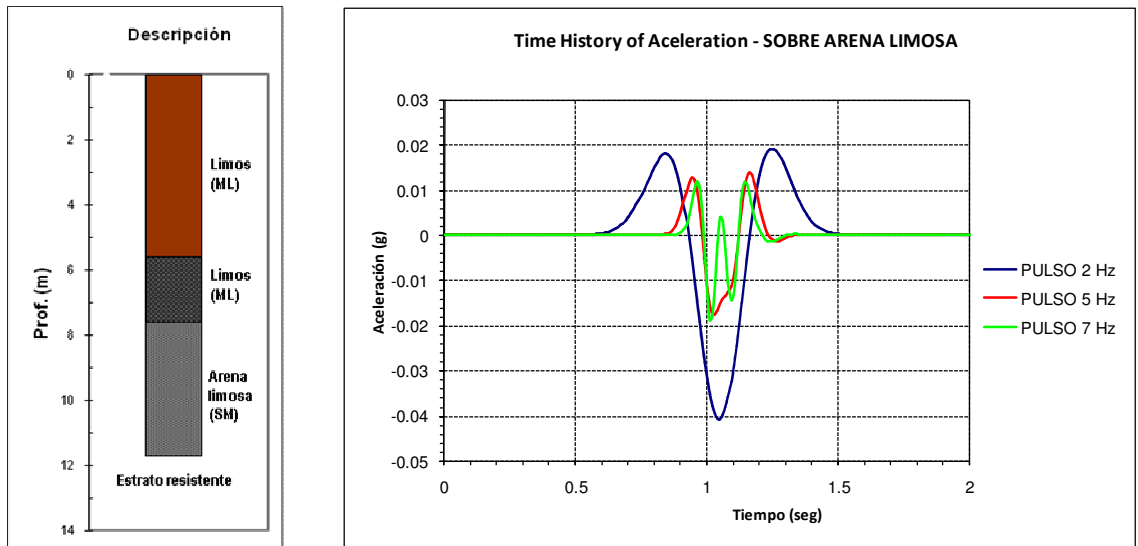


Figura 7.17. Registros de aceleración obtenidos en arena limosa (SM) a la profundidad de 7.5 mts a 11.65 mts, del perfil sector Torres Valle de Atriz.

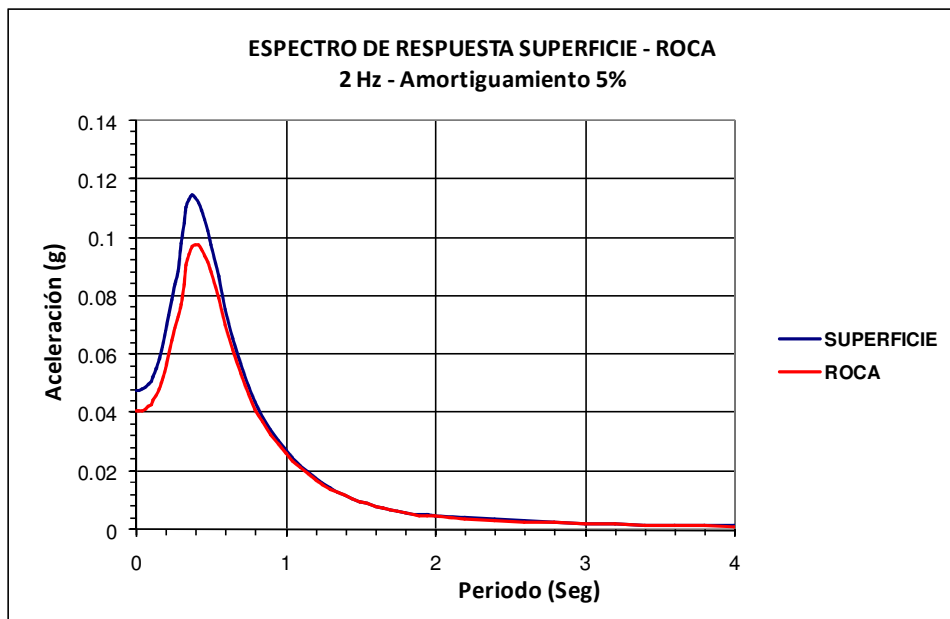


Figura 7.18. Espectro de respuesta en superficie y roca para el perfil sector Torres Valle de Atriz, considerando como registros de entrada en estrato resistente pulsos de Ricker de 2, Hz.

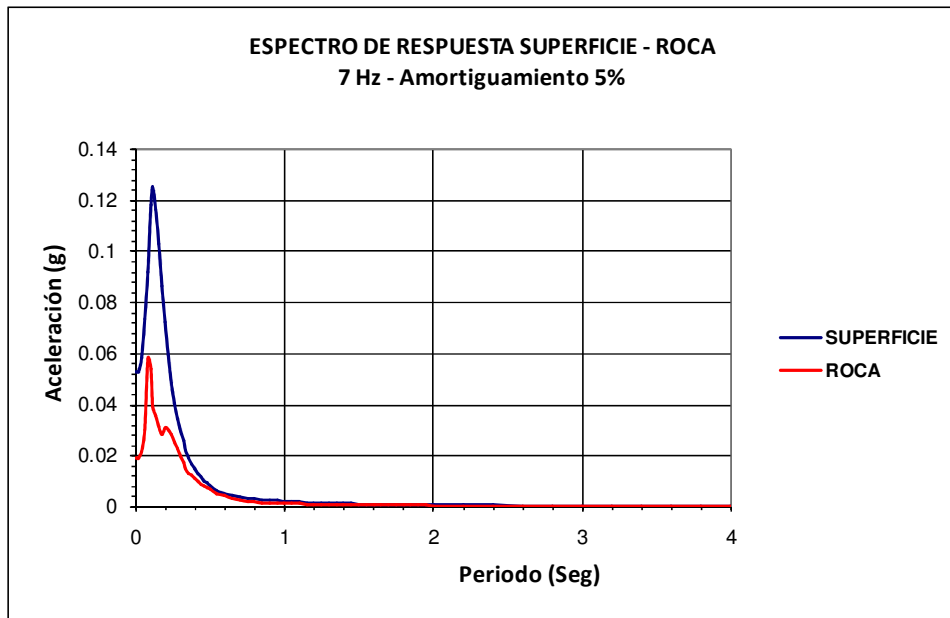
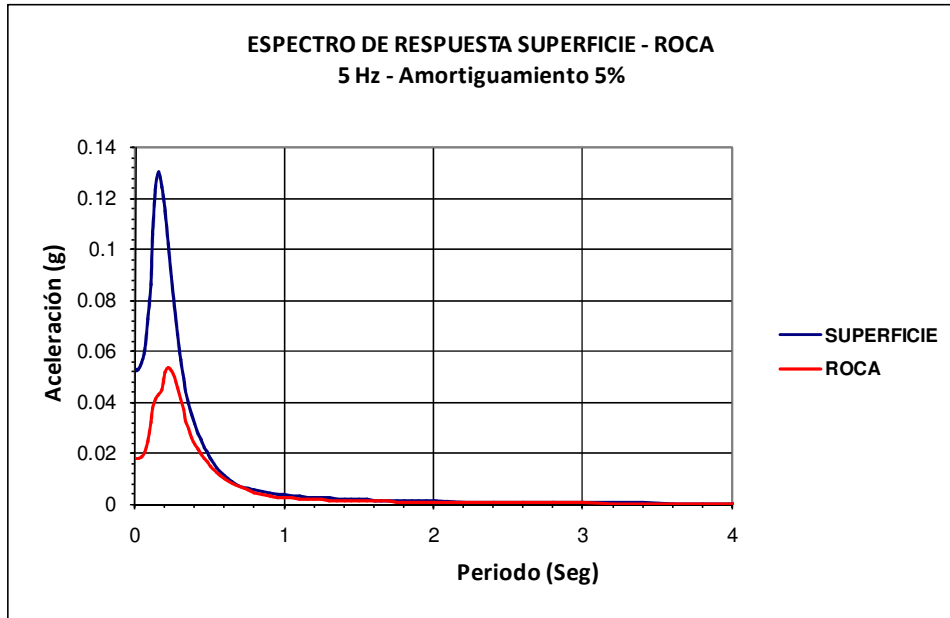


Figura 7.19. Espectro de respuesta en superficie y roca para el perfil sector Torres Valle de Atriz, considerando como registros de entrada en estrato resistente pulsos de Ricker de 5, y 7 Hz.

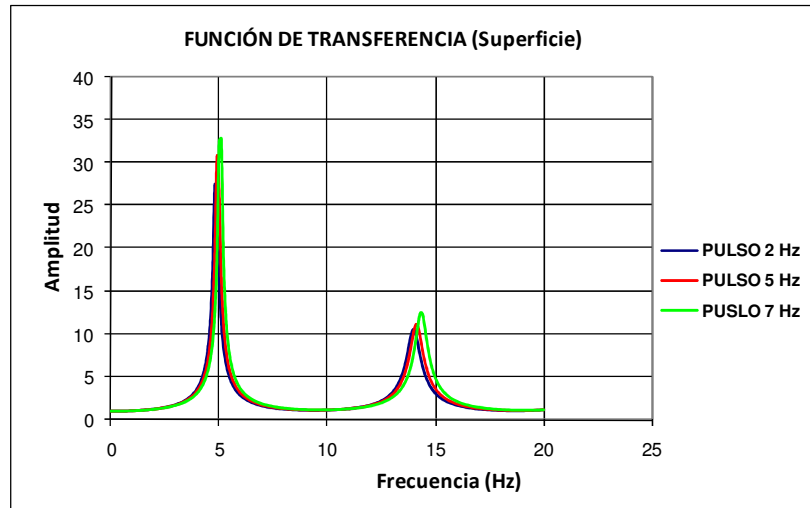


Figura 7.20. Función de transferencia en superficie sector Torres Valle de Atriz.

En la tabla 7.2 se muestra un resumen de los resultados obtenidos, a partir de la cual se realizan las siguientes anotaciones:

| PERFIL No. | SEÑAL DE ENTRADA | FRECUENCIA FUNDAMENTAL (Hz) | AMPLITUD PICO |
|------------------------|------------------|-----------------------------|---------------|
| BARRIO AQUINE | 2 Hz | 7.8 | 25.87 |
| | 5 Hz | 7.7 | 22.79 |
| | 7 Hz | 7.7 | 22.73 |
| BARRIO ARANDA | 2 Hz | 7.8 | 25.87 |
| | 5 Hz | 7.7 | 22.79 |
| | 7 Hz | 7.7 | 22.73 |
| COLEGIO BETHLEMITAS | 2 Hz | 15.8 | 40.99 |
| | 5 Hz | 15.8 | 41.10 |
| | 7 Hz | 15.9 | 41.43 |
| COLEGIO LIBERTAD | 2 Hz | 16.4 | 43.44 |
| | 5 Hz | 16.4 | 43.72 |
| | 7 Hz | 16.5 | 44.24 |
| HOSPITAL DEPARTAMENTAL | 2 Hz | 6.2 | 24.42 |
| | 5 Hz | 6.2 | 25.13 |
| | 7 Hz | 6.3 | 27.86 |
| EMPOPASTO CENTENARIO | 2 Hz | 5.7 | 15.32 |
| | 5 Hz | 5.7 | 17.55 |
| | 7 Hz | 5.7 | 19.66 |

Tabla 7.2. Resultados obtenidos en superficie al aplicar ProShake a los 23 perfiles estratigráficos de la zona en estudio.

| PERFIL No. | SEÑAL DE ENTRADA | FRECUENCIA FUNDAMENTAL (Hz) | AMPLITUD PICO |
|---------------------------------------|------------------|-----------------------------|---------------|
| EMPOPASTO MIJITAYO | 2 Hz | 6.4 | 47.13 |
| | 5 Hz | 6.5 | 48.81 |
| | 7 Hz | 6.5 | 49.48 |
| ESTADIO LIBERTAD | 2 Hz | 2.6 | 16.06 |
| | 5 Hz | 3.0 | 28.92 |
| | 7 Hz | 3.2 | 36.61 |
| UDENAR FACULTAD DE ARTES | 2 Hz | 9.8 | 24.47 |
| | 5 Hz | 9.8 | 25.66 |
| | 7 Hz | 9.9 | 27.37 |
| UDENAR FAC. INGENIERIA | 2 Hz | 20.8 | 56.98 |
| | 5 Hz | 20.8 | 56.96 |
| | 7 Hz | 20.8 | 56.99 |
| COLEGIO INEM | 2 Hz | 12.1 | 49.36 |
| | 5 Hz | 12.2 | 52.03 |
| | 7 Hz | 12.2 | 54.12 |
| COLEGIO SAN FRANCISCO JAVIER PRIMARIA | 2 Hz | 6.1 | 41.65 |
| | 5 Hz | 6.2 | 45.19 |
| | 7 Hz | 6.3 | 47.32 |
| BARRIO LA PAZ | 2 Hz | 14.7 | 44.59 |
| | 5 Hz | 14.7 | 44.33 |
| | 7 Hz | 14.7 | 44.38 |
| SECTOR MORASURCO | 2 Hz | 9.5 | 23.54 |
| | 5 Hz | 9.5 | 23.50 |
| | 7 Hz | 9.5 | 23.78 |
| SECTOR LOTE NUEVO JAVERIANO | 2 Hz | 16.8 | 43.77 |
| | 5 Hz | 16.8 | 44.15 |
| | 7 Hz | 16.8 | 44.52 |
| BARRIO PANDIACO | 2 Hz | 3.8 | 16.75 |
| | 5 Hz | 4.0 | 21.06 |
| | 7 Hz | 4.1 | 27.32 |
| SECTOR DOS PUENTES | 2 Hz | 11.4 | 56.80 |
| | 5 Hz | 11.4 | 57.70 |
| | 7 Hz | 11.4 | 57.55 |
| PLAZA DEL CARNAVAL | 2 Hz | 7.1 | 47.10 |
| | 5 Hz | 7.2 | 55.55 |
| | 7 Hz | 7.3 | 53.27 |

Tabla 7.2. Resultados obtenidos en superficie al aplicar ProShake a los 23 perfiles estratigráficos de la zona en estudio. (Continuación)

| PERFIL No. | SEÑAL DE ENTRADA | FRECUENCIA FUNDAMENTAL (Hz) | AMPLITUD PICO |
|------------------------------|------------------|-----------------------------|---------------|
| SECTOR POTRERILLO | 2 Hz | 5.8 | 34.55 |
| | 5 Hz | 5.8 | 39.44 |
| | 7 Hz | 5.9 | 44.58 |
| PARQUE INFANTIL | 2 Hz | 13.5 | 26.82 |
| | 5 Hz | 13.5 | 26.78 |
| | 7 Hz | 13.5 | 26.88 |
| SENA | 2 Hz | 11.4 | 36.37 |
| | 5 Hz | 11.4 | 36.50 |
| | 7 Hz | 11.5 | 36.70 |
| BARRIO EL TEJAR | 2 Hz | 16.8 | 45.41 |
| | 5 Hz | 16.8 | 45.56 |
| | 7 Hz | 16.8 | 45.96 |
| SECTOR TORRES VALLE DE ATRIZ | 2 Hz | 4.8 | 27.39 |
| | 5 Hz | 4.9 | 30.67 |
| | 7 Hz | 5.1 | 32.80 |

Tabla 7.2. Resultados obtenidos en superficie al aplicar ProShake a los 23 perfiles estratigráficos de la zona en estudio. (Continuación)

- El pulso de Ricker de entrada con frecuencia de 7 Hz tiene una aceleración máxima de 0,045g. Es en el perfil 1 (Sector Aquine) donde se presenta un mayor aumento de la aceleración con un valor máximo de 0,071g lo que significa un aumento alrededor de 1,6 veces. La frecuencia fundamental de este perfil tiene un valor de 7,7 Hz, siendo ésta cercana a la de la señal de entrada.
- La duración Trifunac (1975) se define como el intervalo de tiempo entre los puntos para los cuales se ha liberado del 5% al 95% de la energía. Numéricamente, corresponde al tiempo comprendido entre el 5% y el 95% del diagrama de Husid, que muestra como está distribuida la energía de un movimiento. Matemáticamente, es un gráfico de la aceleración al cuadrado normalizada y acumulada vs el tiempo:

$$H(t) = \frac{\int_0^t a(t)^2 dt}{\int_0^{\infty} a(t)^2 dt}$$

Se observa que para cada perfil, esta duración disminuye al aumentar la frecuencia del pulso de Ricker de entrada.

- La intensidad de espectro de respuesta, se define como:

$$SI(\omega) = \int_{0.1}^{20} PSV(\omega) dt$$

Este parámetro caracteriza el contenido frecuencial y la amplitud del espectro de respuesta en pseudo velocidad (PSV) entre 10 Hz y 0,4 Hz (0,1s – 2,5s de periodo) para un 5% de amortiguamiento, rango de frecuencia de máximo interés en el campo de la ingeniería sísmica. En general para todos los perfiles la intensidad de espectro de respuesta disminuye a medida que aumenta la frecuencia del pulso de Ricker de entrada, excepto para el perfil 1 (Sector Aquine). El mayor valor se obtiene en el perfil 16 (Sector Pandiaco) para la frecuencia de 2 Hz del pulso de Ricker.

- En el perfil 1 (Sector Aquine), la frecuencia fundamental se obtiene en torno a 7,7 Hz, para los pulsos de Ricker de 5 y 7 Hz se obtiene una intensidad de espectro de respuesta superior a los otros perfiles, siendo este un valor promedio de acuerdo a los resultados obtenidos en los demás perfiles.
- De acuerdo a los resultados obtenidos se observa un rango de frecuencia fundamental a partir de la función de transferencia obtenidas en cada perfil de (2,6 a 20,8) Hz ó un rango de periodos fundamentales de (0,05 – 0,38) segundos.

7.5. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA APLICACIÓN DEL PROGRAMA PROSHAKE CON ACELEROGRAMAS DE SISMOS CON MAGNITUD LOCAL (ML) ENTRE 2,5 Y 6,8

Con el propósito de analizar el comportamiento de los 23 perfiles ante excitaciones sísmicas de distintas magnitudes, se realizó una selección de 6 acelerogramas de la base de datos de movimientos sísmicos europeos (*European Strong Motion Database, 2000*) para un periodo de registro comprendido entre 1971 y 1999, que comprenden magnitudes de 2.5, 4.0, 5.0, 6.0, 6,8 y 6.8

La información general de los sismos seleccionados se indica en la tabla 7.3.

| No. | Sismo | Año | ML | Máx PGA (g) | Componente |
|-----|----------|------|-----|-------------|------------|
| 1 | 000714za | 1996 | 2,5 | 0.0013 | Vertical |
| 2 | 000995za | 1980 | 4,0 | 0.0511 | Vertical |
| 3 | 000044za | 1973 | 5,0 | 0.2002 | Vertical |
| 4 | 000175za | 1978 | 6,0 | 0.1222 | Vertical |
| 5 | 000333za | 1981 | 6,8 | 0.1160 | Vertical |
| 6 | 000334za | 1981 | 6,8 | 0.1265 | Vertical |

Tabla 7.3. Información general de los sismos seleccionados para análisis de los perfiles en estudio.

Una vez obtenidos los resultados de la aplicación del programa, se seleccionaron, para los 23 perfiles estratigráficos, aquellos parámetros de interés para el presente estudio que se anotan a continuación:

- ✓ Registro de aceleraciones en el basamento rocoso y en la parte superior de los estratos.
- ✓ Espectros de respuesta en roca y superficie.

- ✓ De los espectros de respuesta obtenidos en superficie en cada perfil, se obtuvo un espectro de respuesta promedio para cada magnitud.
- ✓ De los resultados de aceleraciones en roca y superficie, espectros de respuesta en roca y superficie se muestra en la figura 7.20 un ejemplo para el sismo número 3 en el perfil del sector Torres Valle de Atriz, los restantes se muestran en el anexo 1. La función de transferencia para este perfil y las seis señales de entrada se indica en la figura 7.21.
- ✓ El análisis de los espectros de respuesta promedio para las señales de entrada consideradas para todos los perfiles se muestran en el capítulo 8.

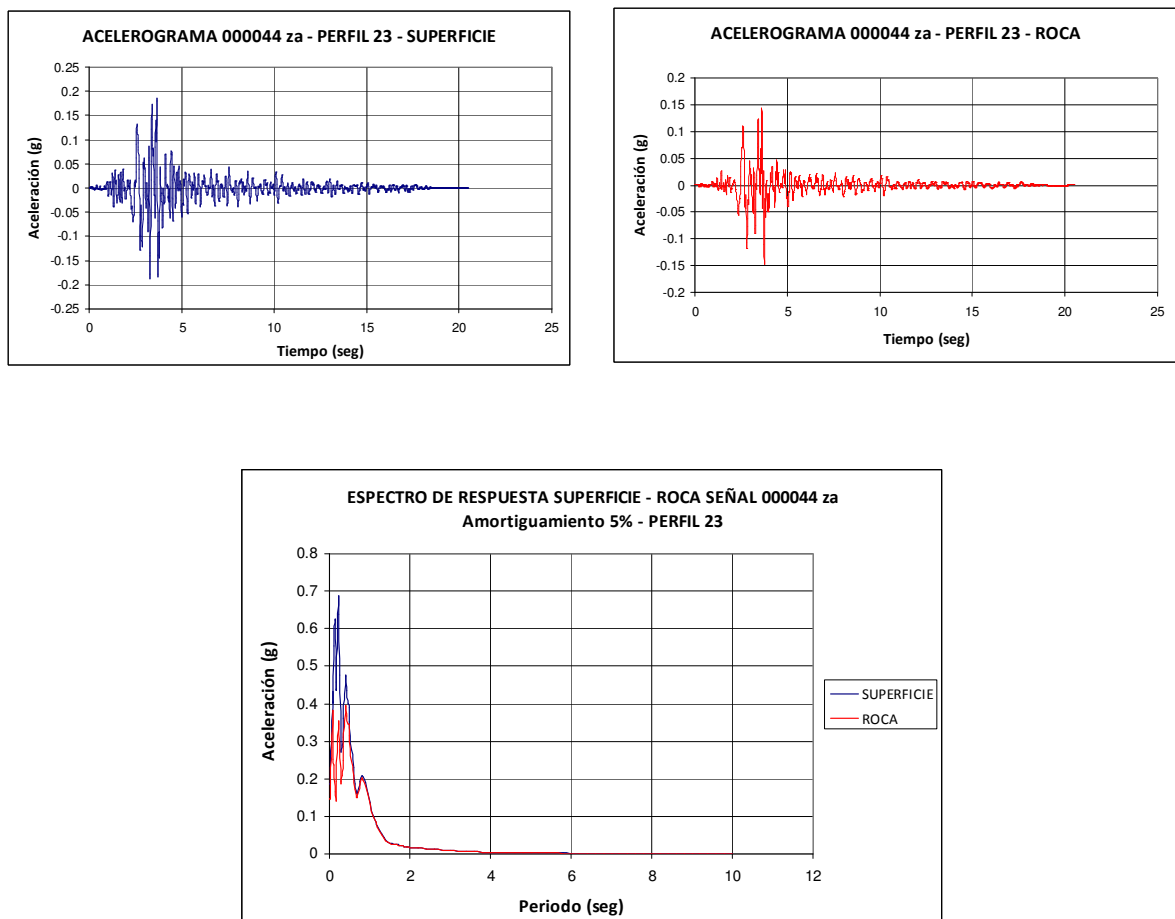


Figura 7.21. Resultado obtenido de la aplicación del programa ProShake para el acelerograma 000044za y el perfil del sector Torres Valle de Atriz.

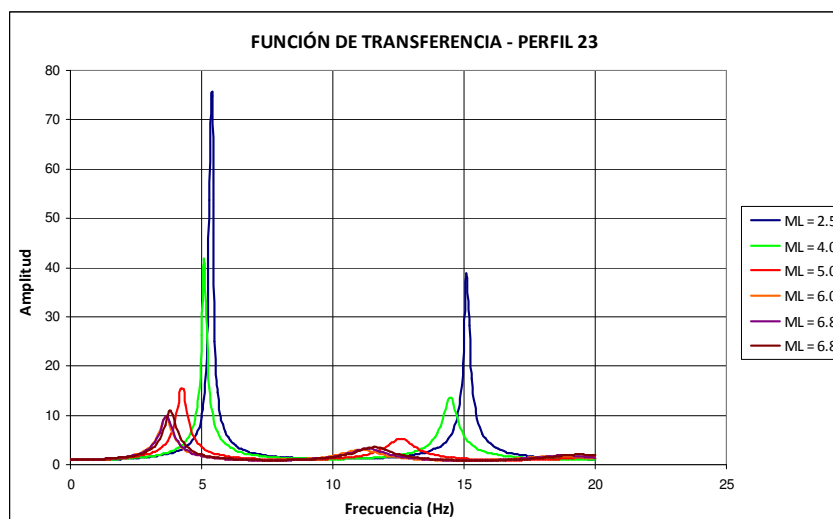


Figura 7.22. Función de transferencia para todas las señales y el perfil del sector Torres Valle de Atriz.

En la tabla 7.4 se indican algunos de los parámetros obtenidos en superficie al aplicar el programa ProShake a los 23 perfiles estratigráficos.

| PERFIL No. | SEÑAL DE ENTRADA | FRECUENCIA FUNDAMENTAL (Hz) | AMPLITUD PICO |
|----------------------|------------------|-----------------------------|---------------|
| SECTOR BARRIO AQUINE | ML = 2.5 | 8.2 | 54.71 |
| | ML = 4.0 | 7.8 | 23.94 |
| | ML = 5.0 | 6.7 | 10.92 |
| | ML = 6.0 | 7.2 | 15.25 |
| | ML = 6.8 | 7.4 | 17.28 |
| | ML = 6.8 | 7.2 | 15.40 |
| SECTOR NUEVA ARANDA | ML = 2.5 | 12.2 | 355.65 |
| | ML = 4.0 | 11.5 | 64.04 |
| | ML = 5.0 | 10.0 | 26.14 |
| | ML = 6.0 | 9.0 | 17.44 |
| | ML = 6.8 | 9.2 | 18.43 |
| | ML = 6.8 | 8.7 | 15.06 |
| COLEGIO BETHLEMITAS | ML = 2.5 | 16.0 | 69.34 |
| | ML = 4.0 | 15.9 | 44.65 |
| | ML = 5.0 | 15.3 | 24.42 |
| | ML = 6.0 | 14.6 | 15.85 |
| | ML = 6.8 | 14.7 | 16.72 |
| | ML = 6.8 | 14.9 | 18.90 |

Tabla 7.4. Parámetros sísmicos obtenidos en superficie al aplicar ProShake a los 23 perfiles estratigráficos de la zona de estudio.

| PERFIL No. | SEÑAL DE ENTRADA | FRECUENCIA FUNDAMENTAL (Hz) | AMPLITUD PICO |
|--------------------------|------------------|-----------------------------|---------------|
| COLEGIO LIBERTAD | ML = 2.5 | 16.5 | 69.34 |
| | ML = 4.0 | 16.5 | 44.65 |
| | ML = 5.0 | 15.9 | 24.42 |
| | ML = 6.0 | 15.1 | 15.85 |
| | ML = 6.8 | 15.2 | 16.72 |
| | ML = 6.8 | 15.5 | 18.90 |
| HOSPITAL DEPARTAMENTAL | ML = 2.5 | 6.5 | 69.30 |
| | ML = 4.0 | 6.4 | 29.85 |
| | ML = 5.0 | 5.7 | 13.90 |
| | ML = 6.0 | 5.2 | 8.90 |
| | ML = 6.8 | 5.4 | 10.88 |
| | ML = 6.8 | 5.4 | 10.80 |
| EMPOPASTO CENTENARIO | ML = 2.5 | 5.9 | 237.19 |
| | ML = 4.0 | 5.8 | 23.87 |
| | ML = 5.0 | 5.4 | 9.25 |
| | ML = 6.0 | 4.8 | 6.23 |
| | ML = 6.8 | 5.1 | 7.60 |
| | ML = 6.8 | 5.1 | 7.97 |
| EMPOPASTO MIJITAYO | ML = 2.5 | 7.0 | 358.06 |
| | ML = 4.0 | 6.6 | 60.19 |
| | ML = 5.0 | 5.7 | 25.00 |
| | ML = 6.0 | 4.6 | 12.25 |
| | ML = 6.8 | 5.1 | 16.67 |
| | ML = 6.8 | 5.0 | 15.79 |
| ESTADIO LIBERTAD | ML = 2.5 | 3.5 | 46.96 |
| | ML = 4.0 | 3.3 | 51.59 |
| | ML = 5.0 | 2.1 | 9.12 |
| | ML = 6.0 | 1.9 | 7.33 |
| | ML = 6.8 | 2.0 | 8.04 |
| | ML = 6.8 | 1.9 | 7.33 |
| UDENAR FACULTAD DE ARTES | ML = 2.5 | 10.3 | 217.34 |
| | ML = 4.0 | 10.0 | 31.10 |
| | ML = 5.0 | 9.0 | 13.15 |
| | ML = 6.0 | 8.4 | 9.22 |
| | ML = 6.8 | 8.8 | 11.47 |
| | ML = 6.8 | 8.2 | 8.18 |

Tabla 7.4. Parámetros sísmicos obtenidos en superficie al aplicar ProShake a los 23 perfiles estratigráficos de la zona de estudio. (Continuación)

| PERFIL No. | SEÑAL DE ENTRADA | FRECUENCIA FUNDAMENTAL (Hz) | AMPLITUD PICO |
|---|------------------|-----------------------------|---------------|
| UDENAR FACULTAD DE INGENIERÍA | ML = 2.5 | 21.2 | 122.72 |
| | ML = 4.0 | 20.8 | 58.68 |
| | ML = 5.0 | 19.8 | 33.76 |
| | ML = 6.0 | 19.2 | 27.09 |
| | ML = 6.8 | 19.1 | 26.67 |
| | ML = 6.8 | 19.3 | 28.16 |
| COLEGIO INEM | ML = 2.5 | 12.6 | 126.93 |
| | ML = 4.0 | 12.3 | 59.41 |
| | ML = 5.0 | 11.3 | 28.59 |
| | ML = 6.0 | 10.3 | 18.18 |
| | ML = 6.8 | 9.7 | 14.13 |
| | ML = 6.8 | 10.0 | 15.61 |
| COLEGIO SAN FRANCISCO JAVIER PRIMARIA | ML = 2.5 | 6.7 | 237.88 |
| | ML = 4.0 | 6.3 | 49.08 |
| | ML = 5.0 | 5.4 | 19.51 |
| | ML = 6.0 | 4.1 | 8.27 |
| | ML = 6.8 | 4.4 | 10.00 |
| | ML = 6.8 | 4.6 | 11.96 |
| BARRIO LA PAZ | ML = 2.5 | 14,7 | 65.67 |
| | ML = 4.0 | 14,7 | 45.20 |
| | ML = 5.0 | 14.5 | 28.42 |
| | ML = 6.0 | 14.2 | 20.42 |
| | ML = 6.8 | 14.2 | 19.64 |
| | ML = 6.8 | 14.2 | 20.53 |
| SECTOR MORASURCO | ML = 2.5 | 9.6 | 27.95 |
| | ML = 4.0 | 9.6 | 24.80 |
| | ML = 5.0 | 9.1 | 16.50 |
| | ML = 6.0 | 8.9 | 14.29 |
| | ML = 6.8 | 9.0 | 15.54 |
| | ML = 6.8 | 8.9 | 13.89 |
| SECTOR LOTE COLEGIO NUEVO JAVERIANO | ML = 2.5 | 16.9 | 72.57 |
| | ML = 4.0 | 16.9 | 47.34 |
| | ML = 5.0 | 16.4 | 27.48 |
| | ML = 6.0 | 15.8 | 19.25 |
| | ML = 6.8 | 15.7 | 18.29 |
| | ML = 6.8 | 15.9 | 20.58 |

Tabla 7.4. *Parámetros sísmicos obtenidos en superficie al aplicar ProShake a los 23 perfiles estratigráficos de la zona de estudio. (Continuación)*

| PERFIL No. | SEÑAL DE ENTRADA | FRECUENCIA FUNDAMENTAL (Hz) | AMPLITUD PICO |
|--------------------|------------------|-----------------------------|---------------|
| BARRIO PANDIACO | ML = 2.5 | 4.5 | 55.20 |
| | ML = 4.0 | 4.2 | 31.56 |
| | ML = 5.0 | 3.2 | 9.65 |
| | ML = 6.0 | 2.9 | 7.90 |
| | ML = 6.8 | 3.0 | 8.66 |
| | ML = 6.8 | 3.0 | 8.54 |
| SECTOR DOS PUENTES | ML = 2.5 | 12.2 | 242.24 |
| | ML = 4.0 | 11.5 | 61.87 |
| | ML = 5.0 | 10.0 | 25.75 |
| | ML = 6.0 | 9.1 | 17.34 |
| | ML = 6.8 | 9.2 | 18.21 |
| | ML = 6.8 | 8.8 | 16.09 |
| PLAZA DEL CARNAVAL | ML = 2.5 | 7.8 | 1004.85 |
| | ML = 4.0 | 7.4 | 57.35 |
| | ML = 5.0 | 6.4 | 25.88 |
| | ML = 6.0 | 5.1 | 12.46 |
| | ML = 6.8 | 5.5 | 15.73 |
| | ML = 6.8 | 5.6 | 16.50 |
| SECTOR POTRERILLO | ML = 2.5 | 6.5 | 451.05 |
| | ML = 4.0 | 6.1 | 46.56 |
| | ML = 5.0 | 5.0 | 19.58 |
| | ML = 6.0 | 3.8 | 8.98 |
| | ML = 6.8 | 3.9 | 9.02 |
| | ML = 6.8 | 4.1 | 10.40 |
| PARQUE INFANTIL | ML = 2.5 | 13.6 | 31.52 |
| | ML = 4.0 | 13.6 | 27.92 |
| | ML = 5.0 | 13.1 | 19.15 |
| | ML = 6.0 | 12.8 | 16.44 |
| | ML = 6.8 | 12.8 | 16.27 |
| | ML = 6.8 | 12.7 | 15.87 |
| SENA | ML = 2.5 | 11.6 | 73.58 |
| | ML = 4.0 | 11.5 | 40.77 |
| | ML = 5.0 | 10.8 | 20.98 |
| | ML = 6.0 | 10.4 | 16.53 |
| | ML = 6.8 | 10.0 | 13.32 |
| | ML = 6.8 | 10.2 | 14.64 |

Tabla 7.4. *Parámetros sísmicos obtenidos en superficie al aplicar ProShake a los 23 perfiles estratigráficos de la zona de estudio. (Continuación)*

| PERFIL No. | SEÑAL DE ENTRADA | FRECUENCIA FUNDAMENTAL (Hz) | AMPLITUD PICO |
|-----------------------|------------------|-----------------------------|---------------|
| BARRIO EL TEJAR | ML = 2.5 | 16.8 | 68.27 |
| | ML = 4.0 | 16.8 | 48.43 |
| | ML = 5.0 | 16.6 | 29.43 |
| | ML = 6.0 | 16.4 | 21.93 |
| | ML = 6.8 | 16.4 | 22.23 |
| | ML = 6.8 | 16.4 | 21.90 |
| TORRES VALLE DE ATRIZ | ML = 2.5 | 5.4 | 74.75 |
| | ML = 4.0 | 5.1 | 41.89 |
| | ML = 5.0 | 4.3 | 15.41 |
| | ML = 6.0 | 3.6 | 9.64 |
| | ML = 6.8 | 3.7 | 9.89 |
| | ML = 6.8 | 3.8 | 11.07 |

Tabla 7.4. Parámetros sísmicos obtenidos en superficie al aplicar ProShake a los 23 perfiles estratigráficos de la zona de estudio. (Continuación)

En la tabla 7.5 se observan algunos parámetros sísmicos en el basamento rocoso, que sirven de orientación para el análisis.

| Señal de entrada | Máx PGA (g) | Duración Trifunac (s) | Intensidad de Arias (Ia) |
|------------------|-------------|-----------------------|--------------------------|
| 000714za | 0.0013 | 3.59 | 0.0000 |
| 000995za | 0.0511 | 3.88 | 0.0266 |
| 000044za | 0.2002 | 5.66 | 0.7055 |
| 000175za | 0.1222 | 9.29 | 0.5492 |
| 000333za | 0.1160 | 18.86 | 0.6343 |
| 000334za | 0.1265 | 19.85 | 0.1265 |

Tabla 7.5. Principales parámetros sísmicos en el basamento rocoso.

- ✓ Observando las seis señales de entrada con aceleraciones máximas en superficie y en estrato resistente indicadas en la tabla 7.4 y 7.5 respectivamente; es en el perfil 4 (Sector Colegio Libertad) donde se presenta un factor de amplificación de aceleración para la señal de entrada número 4 con un valor máximo de 0,54g, lo que significa una amplificación de alrededor 4,4 veces. La frecuencia fundamental de éste perfil tiene en promedio un valor de 15,8 Hz.
- ✓ La duración Trifunac, en todas las señales, se incrementa al aumentar la magnitud de la señal de entrada, en general para las magnitudes de 2,5 a 5,0 se incrementa al aumentar la frecuencia y para magnitudes de 6,0 y 6,8 disminuye al aumentar la frecuencia y disminuye al aumentar la amplitud pico.

- ✓ El mayor valor de la intensidad del espectro de respuesta se obtiene en el perfil 8 (Sector Estadio Libertad), donde la frecuencia fundamental de la función de transferencia es de 2,5 Hz. Es importante anotar para la interpretación de la intensidad espectral hay que señalar que el espectro de respuesta de cada periodo de vibración se puede asociar a una altura determinada de un edificio, por lo que se puede determinar que vibraciones pueden hacer entrar en resonancia a una estructura en especial. Por lo tanto, la intensidad espectral se utiliza como parámetro que mide el daño medio que sufren las estructuras. (Carreño, 1999).
- ✓ En la tabla 7.6, se observa los resultados de asociar el periodo de vibración del espectro de respuesta, calculado a partir del método numérico Proshake, con señales de entrada en el estrato resistente, sismos de magnitud Local 2.5, 4.0, 5.0, 6.0 y 6.8, con la altura determinada de los edificios, según la ecuación A.4.2 de la NSR-98, a partir del periodo para cada sector y con $C_t = 0,08$.
- ✓ Es importante anotar que los cambios fundamentales que sufre la señal al ser filtrada a través del suelo dependen de las características físicas, mecánicas y dinámicas de los materiales, así se encontrarán perfiles que muestran un comportamiento espectral similar. Esto permite concluir, que en una buena medida, cuanto mejor sea el conocimiento de los parámetros característicos del suelo, más se ajustará un modelo a la realidad.
- ✓ La intensidad de Arias obtenida en superficie, se aumenta con respecto a la del basamento rocoso. En general para todos los perfiles este aumento se encuentra entre 2 y 3 veces. En general la intensidad de Arias se aumenta en la medida que se aumenta la aceleración en superficie.
- ✓ Comparando los resultados de los pulsos de Ricker con los acelerogramas de distintas magnitudes, se obtienen frecuencias fundamentales de las funciones de transferencia similares y en amplitudes, excepto para el sismo de Magnitud Local 2,5. Las aceleraciones máximas de los acelerogramas de entrada se amplifican en 2,8 veces respecto a los pulsos de Ricker.

| PERFIL No. | SEÑAL DE ENTRADA | FRECUENCIA FUNDAMENTAL (Fo Hz) | PERIODO (To Seg) | h_n (metros) |
|---------------|------------------|--------------------------------|------------------|----------------|
| BARRIO AQUINE | ML = 2.5 | 8.2 | 0.12 | 2 |
| | ML = 4.0 | 7.8 | 0.13 | 2 |
| | ML = 5.0 | 6.7 | 0.15 | 2 |
| | ML = 6.0 | 7.2 | 0.14 | 2 |
| | ML = 6.8 | 7.4 | 0.14 | 2 |
| | ML = 6.8 | 7.2 | 0.14 | 2 |

Tabla 7.6. Tabla de resumen valores de h_n a partir de A.4.2 – NSR 98.

| PERFIL No. | SEÑAL DE ENTRADA | FRECUENCIA FUNDAMENTAL (Fo Hz) | PERIODO (To Seg) | h _n (metros) |
|------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|-------------------------|
| SECTOR NUEVA ARANDA | ML = 2.5 | 12.2 | 0.08 | 1 |
| | ML = 4.0 | 11.5 | 0.09 | 1 |
| | ML = 5.0 | 10.0 | 0.10 | 1 |
| | ML = 6.0 | 9.0 | 0.11 | 2 |
| | ML = 6.8 | 9.2 | 0.11 | 2 |
| | ML = 6.8 | 8.7 | 0.11 | 2 |
| COLEGIO BETHLEMITAS | ML = 2.5 | 16.0 | 0.06 | 1 |
| | ML = 4.0 | 15.9 | 0.06 | 1 |
| | ML = 5.0 | 15.3 | 0.07 | 1 |
| | ML = 6.0 | 14.6 | 0.07 | 1 |
| | ML = 6.8 | 14.7 | 0.07 | 1 |
| | ML = 6.8 | 14.9 | 0.07 | 1 |
| COLEGIO LIBERTAD | ML = 2.5 | 16.5 | 0.06 | 1 |
| | ML = 4.0 | 16.5 | 0.06 | 1 |
| | ML = 5.0 | 15.9 | 0.06 | 1 |
| | ML = 6.0 | 15.1 | 0.07 | 1 |
| | ML = 6.8 | 15.2 | 0.07 | 1 |
| | ML = 6.8 | 15.5 | 0.06 | 1 |
| HOSPITAL DEPARTAMENTAL | ML = 2.5 | 6.5 | 0.15 | 2 |
| | ML = 4.0 | 6.4 | 0.16 | 2 |
| | ML = 5.0 | 5.7 | 0.18 | 3 |
| | ML = 6.0 | 5.2 | 0.19 | 3 |
| | ML = 6.8 | 5.4 | 0.19 | 3 |
| | ML = 6.8 | 5.4 | 0.19 | 3 |
| EMPOPASTO CENTENARIO | ML = 2.5 | 5.9 | 0.17 | 3 |
| | ML = 4.0 | 5.8 | 0.17 | 3 |
| | ML = 5.0 | 5.4 | 0.19 | 3 |
| | ML = 6.0 | 4.8 | 0.21 | 4 |
| | ML = 6.8 | 5.1 | 0.20 | 3 |
| | ML = 6.8 | 5.1 | 0.20 | 3 |
| EMPOPASTO MIJITAYO | ML = 2.5 | 7.0 | 0.14 | 2 |
| | ML = 4.0 | 6.6 | 0.15 | 2 |
| | ML = 5.0 | 5.7 | 0.18 | 3 |
| | ML = 6.0 | 4.6 | 0.22 | 4 |
| | ML = 6.8 | 5.1 | 0.20 | 3 |
| | ML = 6.8 | 5.0 | 0.20 | 3 |

Tabla 7.6. Tabla de resumen valores de h_n a partir de A.4.2 – NSR 98.
(Continuación)

| PERFIL No. | SEÑAL DE ENTRADA | FRECUENCIA FUNDAMENTAL (Fo Hz) | PERIODO (To Seg) | h _n (metros) |
|---------------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|-------------------------|
| ESTADIO LIBERTAD | ML = 2.5 | 3.5 | 0.29 | 5 |
| | ML = 4.0 | 3.3 | 0.30 | 6 |
| | ML = 5.0 | 2.1 | 0.48 | 11 |
| | ML = 6.0 | 1.9 | 0.53 | 12 |
| | ML = 6.8 | 2.0 | 0.50 | 12 |
| | ML = 6.8 | 1.9 | 0.53 | 12 |
| UDENAR FACULTAD DE ARTES | ML = 2.5 | 10.3 | 0.10 | 1 |
| | ML = 4.0 | 10.0 | 0.10 | 1 |
| | ML = 5.0 | 9.0 | 0.11 | 2 |
| | ML = 6.0 | 8.4 | 0.12 | 2 |
| | ML = 6.8 | 8.8 | 0.11 | 2 |
| | ML = 6.8 | 8.2 | 0.12 | 2 |
| UDENAR FACULTAD DE INGENIERIA | ML = 2.5 | 21.2 | 0.05 | 1 |
| | ML = 4.0 | 20.8 | 0.05 | 1 |
| | ML = 5.0 | 19.8 | 0.05 | 1 |
| | ML = 6.0 | 19.2 | 0.05 | 1 |
| | ML = 6.8 | 19.1 | 0.05 | 1 |
| | ML = 6.8 | 19.3 | 0.05 | 1 |
| COLEGIO INEM | ML = 2.5 | 12.6 | 0.08 | 1 |
| | ML = 4.0 | 12.3 | 0.08 | 1 |
| | ML = 5.0 | 11.3 | 0.09 | 1 |
| | ML = 6.0 | 10.3 | 0.10 | 1 |
| | ML = 6.8 | 9.7 | 0.10 | 1 |
| | ML = 6.8 | 10.0 | 0.10 | 1 |
| COLEGIO SAN FRANCISCO JAVIER PRIMARIA | ML = 2.5 | 6.7 | 0.15 | 2 |
| | ML = 4.0 | 6.3 | 0.16 | 2 |
| | ML = 5.0 | 5.4 | 0.19 | 3 |
| | ML = 6.0 | 4.1 | 0.24 | 4 |
| | ML = 6.8 | 4.4 | 0.23 | 4 |
| | ML = 6.8 | 4.6 | 0.22 | 4 |
| BARRIO LA PAZ | ML = 2.5 | 14.7 | 0.07 | 1 |
| | ML = 4.0 | 14.7 | 0.07 | 1 |
| | ML = 5.0 | 14.5 | 0.07 | 1 |
| | ML = 6.0 | 14.2 | 0.07 | 1 |
| | ML = 6.8 | 14.2 | 0.07 | 1 |
| | ML = 6.8 | 14.2 | 0.07 | 1 |

Tabla 7.6. Tabla de resumen valores de h_n a partir de A.4.2 – NSR 98.
(Continuación)

| PERFIL No. | SEÑAL DE ENTRADA | FRECUENCIA FUNDAMENTAL (Fo Hz) | PERIODO (To Seg) | h _n (metros) |
|-------------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|-------------------------|
| SECTOR MORASURCO | ML = 2.5 | 9.6 | 0.10 | 1 |
| | ML = 4.0 | 9.6 | 0.10 | 1 |
| | ML = 5.0 | 9.1 | 0.11 | 2 |
| | ML = 6.0 | 8.9 | 0.11 | 2 |
| | ML = 6.8 | 9.0 | 0.11 | 2 |
| | ML = 6.8 | 8.9 | 0.11 | 2 |
| SECTOR LOTE COLEGIO NUEVO JAVERIANO | ML = 2.5 | 16.9 | 0.06 | 1 |
| | ML = 4.0 | 16.9 | 0.06 | 1 |
| | ML = 5.0 | 16.4 | 0.06 | 1 |
| | ML = 6.0 | 15.8 | 0.06 | 1 |
| | ML = 6.8 | 15.7 | 0.06 | 1 |
| | ML = 6.8 | 15.9 | 0.06 | 1 |
| BARRIO PANDIACO | ML = 2.5 | 4.5 | 0.22 | 4 |
| | ML = 4.0 | 4.2 | 0.24 | 4 |
| | ML = 5.0 | 3.2 | 0.31 | 6 |
| | ML = 6.0 | 2.9 | 0.34 | 7 |
| | ML = 6.8 | 3.0 | 0.33 | 7 |
| | ML = 6.8 | 3.0 | 0.33 | 7 |
| SECTOR DOS PUENTES | ML = 2.5 | 12.2 | 0.08 | 1 |
| | ML = 4.0 | 11.5 | 0.09 | 1 |
| | ML = 5.0 | 10.0 | 0.10 | 1 |
| | ML = 6.0 | 9.1 | 0.11 | 2 |
| | ML = 6.8 | 9.2 | 0.11 | 2 |
| | ML = 6.8 | 8.8 | 0.11 | 2 |
| PLAZA DEL CARNAVAL | ML = 2.5 | 7.8 | 0.13 | 2 |
| | ML = 4.0 | 7.4 | 0.14 | 2 |
| | ML = 5.0 | 6.4 | 0.16 | 2 |
| | ML = 6.0 | 5.1 | 0.20 | 3 |
| | ML = 6.8 | 5.5 | 0.18 | 3 |
| | ML = 6.8 | 5.6 | 0.18 | 3 |
| SECTOR POTRERILLO | ML = 2.5 | 6.5 | 0.15 | 2 |
| | ML = 4.0 | 6.1 | 0.16 | 3 |
| | ML = 5.0 | 5.0 | 0.20 | 3 |
| | ML = 6.0 | 3.8 | 0.26 | 5 |
| | ML = 6.8 | 3.9 | 0.26 | 5 |
| | ML = 6.8 | 4.1 | 0.24 | 4 |

Tabla 7.6. Tabla de resumen valores de h_n a partir de A.4.2 – NSR 98.
(Continuación)

| PERFIL No. | SEÑAL DE ENTRADA | FRECUENCIA FUNDAMENTAL (Fo Hz) | PERIODO (To Seg) | h _n (metros) |
|-----------------------|------------------|--------------------------------|------------------|-------------------------|
| PARQUE INFANTIL | ML = 2.5 | 13.6 | 0.07 | 1 |
| | ML = 4.0 | 13.6 | 0.07 | 1 |
| | ML = 5.0 | 13.1 | 0.08 | 1 |
| | ML = 6.0 | 12.8 | 0.08 | 1 |
| | ML = 6.8 | 12.8 | 0.08 | 1 |
| | ML = 6.8 | 12.7 | 0.08 | 1 |
| SENA | ML = 2.5 | 11.6 | 0.09 | 1 |
| | ML = 4.0 | 11.5 | 0.09 | 1 |
| | ML = 5.0 | 10.8 | 0.09 | 1 |
| | ML = 6.0 | 10.4 | 0.10 | 1 |
| | ML = 6.8 | 10.0 | 0.10 | 1 |
| | ML = 6.8 | 10.2 | 0.10 | 1 |
| BARRIO EL TEJAR | ML = 2.5 | 16.8 | 0.06 | 1 |
| | ML = 4.0 | 16.8 | 0.06 | 1 |
| | ML = 5.0 | 16.6 | 0.06 | 1 |
| | ML = 6.0 | 16.4 | 0.06 | 1 |
| | ML = 6.8 | 16.4 | 0.06 | 1 |
| | ML = 6.8 | 16.4 | 0.06 | 1 |
| TORRES VALLE DE ATRIZ | ML = 2.5 | 5.4 | 0.19 | 3 |
| | ML = 4.0 | 5.1 | 0.20 | 3 |
| | ML = 5.0 | 4.3 | 0.23 | 4 |
| | ML = 6.0 | 3.6 | 0.28 | 5 |
| | ML = 6.8 | 3.7 | 0.27 | 5 |
| | ML = 6.8 | 3.8 | 0.26 | 5 |

Tabla 7.6. Tabla de resumen valores de h_n a partir de A.4.2 – NSR 98.
(Continuación)

8. DIAGNÓSTICO PRELIMINAR EN LO REFERENTE AL USO DE LA NSR-98

A partir de los valores mínimos “críticos” de velocidad de ondas de corte (V_s) establecidos para cada perfil en estudio, calculados de acuerdo a las correlaciones respecto al valor de penetración estándar N_{spt} y la metodología explicada en el capítulo 4, se determinan los valores de coeficiente de sitio de acuerdo a la NSR-98 (Capítulo A.2.4) y una vez obtenido el máximo valor de $S_a(g)$ del espectro de respuesta en superficie promedio de las señales de entrada para cada uno de los perfiles en análisis mediante el software ProShake, se tienen los parámetros necesarios para calcular el valor de $A_a(g)$ con base en el valor de coeficiente de importancia (Capítulo A.2.5 NSR-98) y establecer un espectro de diseño a partir de la formulación prescrita en la Norma de Diseño y Construcción Sismo Resistente para cada perfil en estudio, procedimiento explicado en el numeral 8.1.

Posteriormente se procedió a calcular los espectros en función de las condiciones locales con base en cada nivel de intensidad sísmica para cada perfil en estudio. Los niveles de intensidad sísmica están definidos de acuerdo al valor de $A_a(g)$. Inicialmente se calculan los espectros para cada uno de los valores de A_a definidos en el numeral 8.1. También se calculan los espectros para el nivel de intensidad sísmica recomendado en la ciudad de San Juan de Pasto de acuerdo a la NSR-98 ($A_a = 0,30 g$). Los procedimientos para la obtención de cada uno de los espectros de diseño, los resultados obtenidos y una gráfica comparativa de los mismos se detallan a continuación.

8.1 CÁLCULO DE ESPECTROS ELÁSTICOS DE DISEÑO DE ACUERDO A LA NSR-98 TÍTULO A, CAPÍTULO A2, PARA LOS PERFILES EN ESTUDIO.²⁷

De acuerdo a la NSR-98 el espectro elástico de diseño se calcula mediante las ecuaciones que se muestran en la figura A.2-4 (Figura 8.1), así

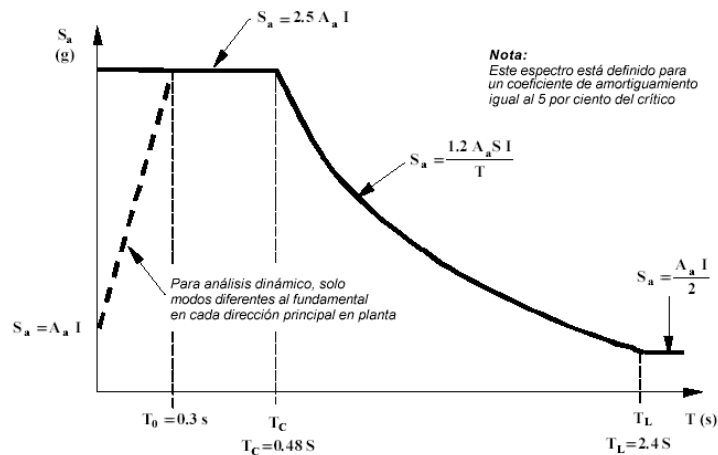


Figura 8.1. Espectro elástico de diseño – NSR-98

²⁷ NORMAS COLOMBIANAS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SISMO-RESISTENTE NSR-98. Bogotá: Cuarta edición, marzo 2003.

Siendo:

A_a = Coeficiente que representa la aceleración pico efectiva, para diseño dado en A.2.2
 $A_a = 0,30g$ para la ciudad de San Juan de Pasto, región 7, figura A.2-2, NSR-98.

I = Coeficiente de importancia definido en A.2.5.2 NSR-98.

Toma los siguientes valores de acuerdo a la tabla A.2-4 NSR-98 (Tabla 8.1).

TABLA A.2-4
VALORES DEL COEFICIENTE DE IMPORTANCIA, I

| Grupo de uso | Coeficiente de Importancia, I |
|---------------------|--------------------------------------|
| IV | 1.3 |
| III | 1.2 |
| II | 1.1 |
| I | 1.0 |

Tabla 8.1. Valores coeficiente de importancia – NSR-98.

S = Coeficiente de sitio dado en A.2.4.2 NSR-98.

Toma los siguientes valores de acuerdo a la tabla A.2-3 NSR-98 (Tabla 8.2).

TABLA A.2-3
VALORES DEL COEFICIENTE DE SITIO, S

| Tipo del perfil de suelo | Coeficiente de Sitio, S |
|---------------------------------|--------------------------------|
| S ₁ | 1.0 |
| S ₂ | 1.2 |
| S ₃ | 1.5 |
| S ₄ | 2.0 |

Tabla 8.2. Valores coeficiente de sitio – NSR-98.

S_a = Valor del espectro de aceleraciones de diseño para un periodo de vibración dado. Máxima aceleración horizontal de diseño, expresada como una fracción de aceleración de la gravedad, para un sistema de un grado de libertad con un periodo de vibración T. Esta definido en A.2.6 NSR-98.

T = Periodo de vibración del sistema elástico, en segundos.

T_c = Periodo de vibración, en segundos, correspondiente a la transición entre la zona de aceleración constante del espectro de diseño, para periodos cortos, y la parte descendiente del mismo.

T_L = Periodo de vibración, en segundos, correspondiente al inicio de la zona de aceleración constante del espectro de diseño, para periodos largos.

Inicialmente se procedió a determinar el perfil de suelo ($S_1 - S_4$) para obtener el valor del coeficiente de sitio "S" – Tabla 8.2, para cada uno de los perfiles en análisis a partir de la velocidad de ondas de corte (V_s), calculados de acuerdo a las correlaciones respecto al valor de penetración estándar N_{spt} y la metodología explicada en el capítulo 4. Un resumen de las características del perfil y rangos de velocidades de ondas de corte (V_s) de acuerdo a la NSR-98, se muestra a continuación:

- **PERFIL DE SUELO S_1 :** Es un perfil que tiene las siguientes propiedades:

(a) está compuesto, hasta la superficie, por roca de cualquier característica, que tiene una velocidad de la onda de cortante mayor o igual a 750 metros por segundo, o

(b) perfiles que entre la roca y la superficie están conformados por suelos duros, o densos, con un espesor menor de 60 m, compuestos por depósitos estables de arenas, gravas o arcillas duras, con una velocidad de la onda de cortante mayor o igual a 400 m/seg.

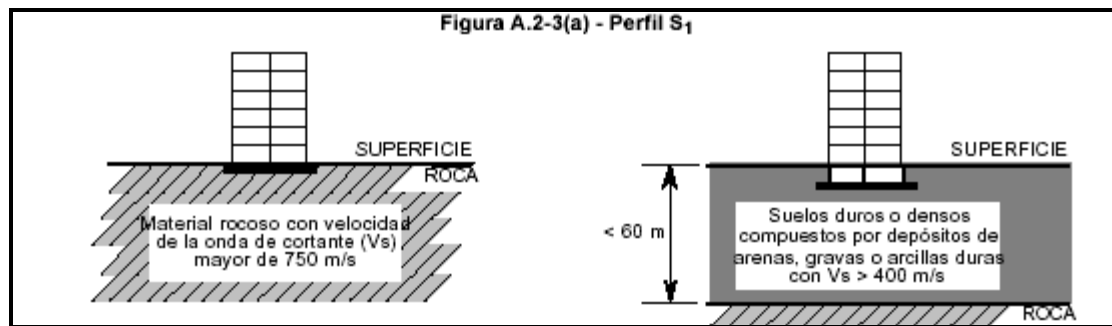


Figura 8.2. Descripción perfil S_1 – NSR-98

- **PERFIL DE SUELO S_2 :** Es un perfil que tiene las siguientes propiedades:

(a) perfiles en donde entre la roca y la superficie existen más de 60 m de depósitos estables de suelos duros, o densos, compuestos por depósitos estables de arcillas duras o suelos no cohesivos, con una velocidad de la onda de cortante mayor o igual a 400 m/s,

(b) perfiles en donde entre la roca y la superficie existen menos de 60 m de depósitos estables de suelos de consistencia media compuestos por materiales con una velocidad de la onda de cortante cuyo valor está entre 270 y 400 m/seg.

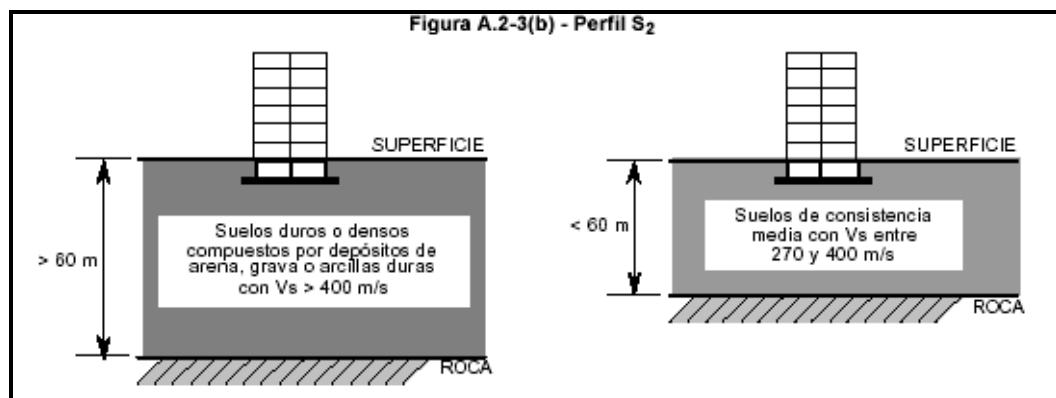


Figura 8.3. Descripción perfil S_2 – NSR-98

- **PERFIL DE SUELO S3** - Es un perfil en donde entre la roca y la superficie hay más de 20 m de suelo que contiene depósitos estables de arcillas cuya dureza varía entre mediana y blanda, con una velocidad de la onda de cortante entre 150 y 270 m/s, y que dentro de ellos, en conjunto, hay menos de 12 m de arcillas blandas.

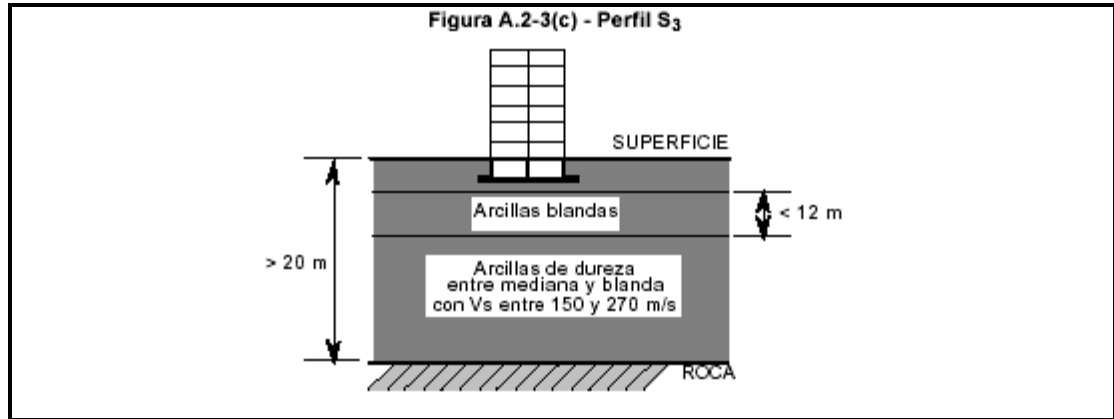


Figura 8.4. Descripción perfil S₃–NSR-98

- **PERFIL DE SUELO S4** - Es un perfil en donde, dentro de los depósitos existentes entre la roca y la superficie hay más de 12 m de arcillas blandas, caracterizadas por una velocidad de la onda de cortante menor de 150 m/seg.

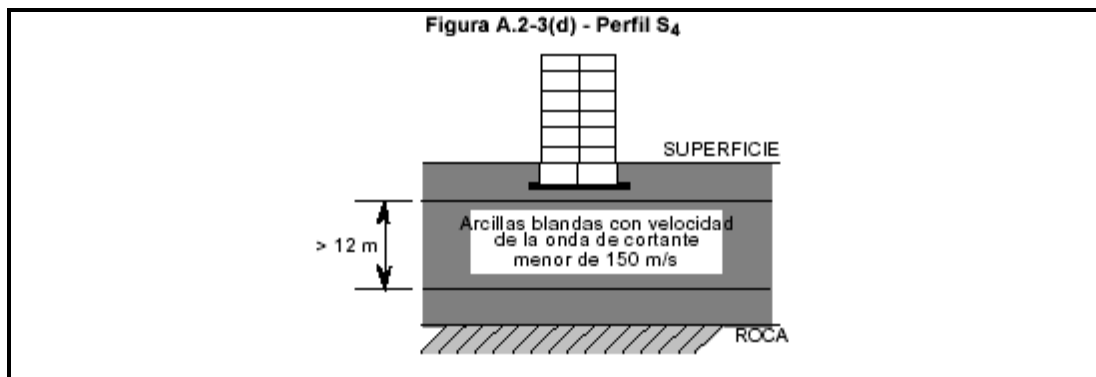


Figura 8.5. Descripción perfil S₄–NSR-98

De acuerdo a los rangos de velocidades de ondas de corte (V_s), dados en los perfiles establecidos de la NSR-98 (S₁–S₄) y con base en los valores de velocidades de ondas de corte (V_s) calculados para cada uno de los perfiles en análisis, se establece el coeficiente de sitio “S_n”. Para realizar el procedimiento de cálculo de los espectros de diseño se adopta el menor de los valores obtenidos de acuerdo a lo anterior (valor crítico). Se anota que por la profundidad alcanzada en las exploraciones realizadas en los sectores en análisis, no se conoce la profundidad del basamento rocoso, por lo cual la selección del perfil y el coeficiente de sitio a partir de esta variable resultan adecuados.

En la tabla 8.3, se muestra las velocidades de ondas de corte (V_s) para cada uno de los perfiles en análisis anotando la máxima, mínima y promedio con su respectivo perfil de suelo y coeficiente de sitio de acuerdo a la tabla A.2-3 NSR-98.

ESTIMACIÓN DEL TIPO DE PERFIL DE SUELO A PARTIR DE V_s - NSR 98

| SECTOR | V_s (m/seg) | Principales valores de V_s (m/seg) | PERFIL DE SUELO | COEFICIENTE DE SITIO, S | S, ASUMIDO |
|--|-------------------------------------|--|----------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| BARRIO AQUINE | 155.05 | PROMEDIO: 299.15 | 2 | 1.20 | 1.5 |
| | 234.72 | MÁXIMO: 413.65 | 1 | 1.00 | |
| | 393.19 | MÍNIMO: 155.05 | 3 | 1.50 | |
| | 413.65 | | | | |
| BARRIO NUEVA ARANDA | 168.31 | PROMEDIO: 260.23 | 3 | 1.50 | 1.5 |
| | 308.89 | MÁXIMO: 319.09 | 2 | 1.20 | |
| | 244.63 | MÍNIMO: 168.31 | 3 | 1.50 | |
| | 319.09 | | | | |
| COLEGIO BETHLEMITAS | 213.98 | PROMEDIO: 318.90 | 2 | 1.20 | 1.5 |
| | 333.73 | MÁXIMO: 413.65 | 1 | 1.00 | |
| | 314.23 | MÍNIMO: 213.98 | 3 | 1.50 | |
| | 413.65 | | | | |
| COLEGIO LIBERTAD | 358.77 | PROMEDIO: 369.67 | 2 | 1.20 | 1.2 |
| | 336.58 | MÁXIMO: 413.65 | 1 | 1.00 | |
| | 413.65 | MÍNIMO: 336.58 | 2 | 1.20 | |
| COLEGIO SAN FRANCISCO JAVIER PRIMARIA | 268.92 | PROMEDIO: 266.11 | 3 | 1.50 | 1.5 |
| | 240.61 | MÁXIMO: 319.09 | 2 | 1.20 | |
| | 261.32 | MÍNIMO: 240.61 | 3 | 1.50 | |
| | 240.61 | | | | |
| | 319.09 | | | | |
| EMPOPASTO CENTENARIO | 308.38 | PROMEDIO: 293.07 | 2 | 1.20 | 1.5 |
| | 236.42 | MÁXIMO: 319.09 | 2 | 1.20 | |
| | 308.38 | MÍNIMO: 236.42 | 3 | 1.50 | |
| | 319.09 | | | | |
| EMPOPASTO SAN FELIPE | 155.05 | PROMEDIO: 267.95 | 3 | 1.50 | 1.5 |
| | 244.63 | MÁXIMO: 324.33 | 2 | 1.20 | |
| | 324.33 | MÍNIMO: 155.05 | 3 | 1.50 | |
| | 296.66 | | | | |
| | 319.09 | | | | |
| ESTADIO LIBERTAD | 226.00 | PROMEDIO: 259.87 | 3 | 1.50 | 1.5 |
| | 186.02 | MÁXIMO: 319.09 | 2 | 1.20 | |
| | 308.38 | MÍNIMO: 186.02 | 3 | 1.50 | |
| | 319.09 | | | | |
| HOSPITAL DEPARTAMENTAL | 268.92 | PROMEDIO: 326.42 | 2 | 1.20 | 1.5 |
| | 314.23 | MÁXIMO: 413.65 | 1 | 1.00 | |
| | 308.89 | MÍNIMO: 268.92 | 3 | 1.50 | |
| | 413.65 | | | | |
| COLEGIO INEM | 399.29 | PROMEDIO: 345.03 | 2 | 1.20 | 1.2 |
| | 308.38 | MÁXIMO: 399.29 | 2 | 1.20 | |
| | 399.29 | MÍNIMO: 299.10 | 2 | 1.20 | |
| | 299.10 | | | | |
| | 319.09 | | | | |

Tabla 8.3. Estimación tipo de perfil de suelo a partir de V_s .

| SECTOR | Vs (m/seg) | Principales valores de Vs (m/seg) | PERFIL DE SUELO | COEFICIENTE DE SITIO, S | S, ASUMIDO |
|------------------------------|--|---|-----------------|-------------------------|------------|
| BARRIO LA PAZ | 297.51 291.41 413.65 | PROMEDIO: 334.19 MÁXIMO: 413.65 MÍNIMO: 291.41 | 2 1 2 | 1.20 1.00 1.20 | 1.2 |
| SECTOR MORASURCO | 168.31 252.55 247.08 349.20 | PROMEDIO: 254.29 MÁXIMO: 349.20 MÍNIMO: 168.31 | 3 2 3 | 1.50 1.20 1.50 | 1.5 |
| LOTE COLEGIO NUEVO JAVERIANO | 297.51 324.33 399.29 413.65 | PROMEDIO: 358.70 MÁXIMO: 413.65 MÍNIMO: 297.51 | 2 1 2 | 1.20 1.00 1.20 | 1.2 |
| BARRIO PANDIACO | 155.05 213.98 168.73 226.00 413.65 | PROMEDIO: 235.48 MÁXIMO: 413.65 MÍNIMO: 155.05 | 3 1 3 | 1.50 1.00 1.50 | 1.5 |
| PARQUE INFANTIL | 268.92 263.43 276.08 336.58 | PROMEDIO: 286.25 MÁXIMO: 336.58 MÍNIMO: 263.43 | 2 2 3 | 1.20 1.20 1.50 | 1.5 |
| PLAZA DEL CARNAVAL | 262.66 296.66 319.09 | PROMEDIO: 292.80 MÁXIMO: 319.09 MÍNIMO: 262.66 | 2 2 3 | 1.20 1.20 1.50 | 1.5 |
| SECTOR POTRERILLO | 291.41 319.37 252.22 319.09 | PROMEDIO: 295.52 MÁXIMO: 319.37 MÍNIMO: 252.22 | 2 2 3 | 1.20 1.20 1.50 | 1.5 |
| COLEGIO PEDAGÓGICO | 278.24 238.34 240.61 319.09 | PROMEDIO: 269.07 MÁXIMO: 319.09 MÍNIMO: 238.34 | 3 2 3 | 1.50 1.20 1.50 | 1.5 |
| SENA | 263.43 399.29 366.28 413.65 | PROMEDIO: 360.66 MÁXIMO: 413.65 MÍNIMO: 263.43 | 2 1 3 | 1.20 1.00 1.50 | 1.5 |
| BARRIO EL TEJAR | 358.77 402.26 354.88 342.56 314.23 413.65 | PROMEDIO: 364.39 MÁXIMO: 413.65 MÍNIMO: 314.23 | 2 1 2 | 1.20 1.00 1.20 | 1.2 |

Tabla 8.3 Estimación tipo de perfil de suelo a partir de V_s . (Continuación)

| SECTOR | Vs (m/seg) | Principales valores de Vs (m/seg) | PERFIL DE SUELO | COEFICIENTE DE SITIO, S | S, ASUMIDO |
|-----------------------------|------------|-----------------------------------|-----------------|-------------------------|------------|
| UDENAR FAC. ING. ZONA VERDE | 308.89 | PROMEDIO: 354.48 | 2 | 1.20 | 1.2 |
| | 299.10 | MÁXIMO: 413.65 | 1 | 1.00 | |
| | 396.27 | MÍNIMO: 299.10 | 2 | 1.20 | |
| | 413.65 | | | | |
| UDENAR FACARTES | 191.57 | PROMEDIO: 290.66 | 2 | 1.20 | 1.5 |
| | 386.87 | MÁXIMO: 386.87 | 2 | 1.20 | |
| | 319.37 | MÍNIMO: 191.57 | 3 | 1.50 | |
| | 236.42 | | | | |
| TORRES VALLE DE ATRIZ | 213.98 | PROMEDIO: 255.43 | 3 | 1.50 | 1.5 |
| | 226.00 | MÁXIMO: 319.09 | 2 | 1.20 | |
| | 262.66 | MÍNIMO: 213.98 | 3 | 1.50 | |
| | 319.09 | | | | |

Tabla 8.3. Estimación tipo de perfil de suelo a partir de V_s . (Continuación)

Una vez determinado el perfil de suelo y los coeficientes de Sitio para cada uno de los sectores en análisis, a partir de los espectros de respuesta en superficie obtenidos en el capítulo 7, se procedió a calcular el máximo valor de S_a .

El valor de S_a , se establece como el máximo pico del espectro de respuesta en superficie promedio, obtenido de los espectros de respuesta en superficie con amortiguamiento de 5%, generados a partir de las 5 señales de entrada utilizadas en ProShake (capítulo 7). Los espectros de respuesta en superficie, su promedio y máximo valor de S_a para el sector del Barrio Aquine, se muestran en la figura 8.6.

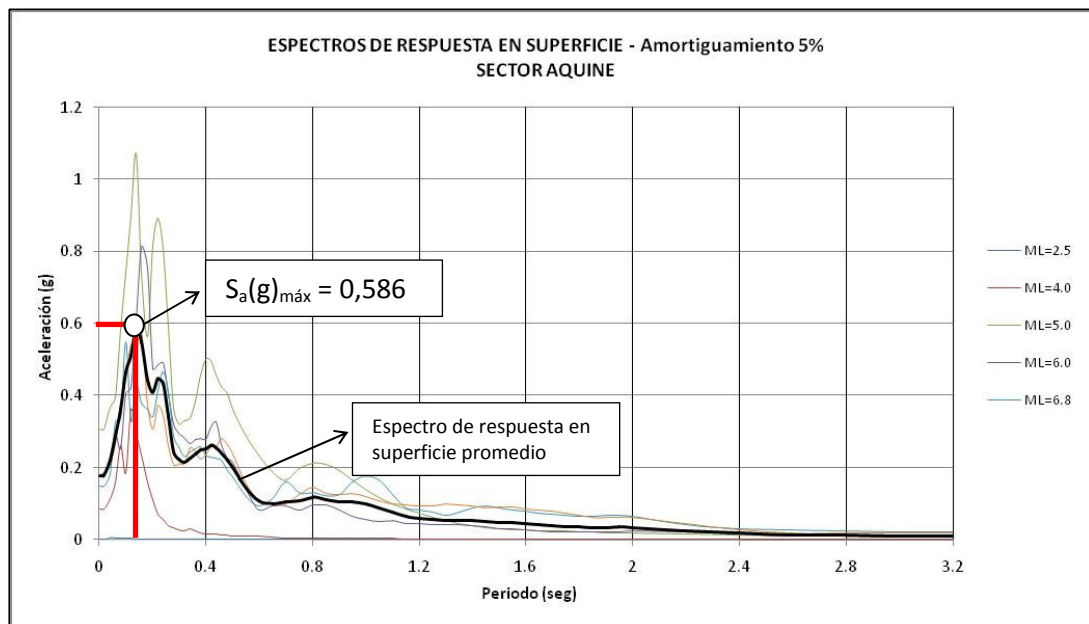


Figura 8.6. Espectros de respuesta en superficie – Amortiguamiento 5%. Sector Aquine.

Después de calcular los máximos valores de S_a y conocer los coeficientes de sitio para cada uno de los perfiles en análisis, se procedió a calcular los valores de aceleración pico efectiva (A_a), para cada valor de Coeficiente de Importancia (I), anotados en la Tabla 8.1, a partir de la ecuación (A.2-3) de la NSR-98

$$S_a = 2,5 A_a I, \text{ siendo } A_a = S_a / (2,5 I)$$

El máximo valor de $S_a(g)$ del espectro de respuesta en superficie promedio, los resultados de A_a para cada coeficiente de importancia, el coeficiente de sitio S de acuerdo a la NSR-98, el valor pico de $S_a(g)$ de los espectros de respuesta en superficie y la señal que lo genera, el valor de $S_a(g)$ máximo de acuerdo a la NSR-98 calculada a partir de la ecuación A.2-3 para cada coeficiente de sitio en cada uno de los perfiles, además de un análisis comparativo de incremento del valor de S_a en porcentaje, se muestra en la figura 8.7.

| SECTOR | | | AQUINE | ARANDA | BETHLE | COLELIB | DEPTAL | EMPOCENT | EMPOMIJI | ESTADIO |
|----------------------------|-----|------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| Sa(g) máx - PGA | | | 0.586 | 1.167 | 1.165 | 1.422 | 1.139 | 0.825 | 1.225 | 0.695 |
| COEFICIENTE DE IMPORTANCIA | I | 1.00 | 0.234 | 0.467 | 0.466 | 0.569 | 0.456 | 0.330 | 0.490 | 0.278 |
| | II | 1.10 | 0.213 | 0.424 | 0.424 | 0.517 | 0.414 | 0.300 | 0.445 | 0.253 |
| | III | 1.20 | 0.195 | 0.389 | 0.388 | 0.474 | 0.380 | 0.275 | 0.408 | 0.232 |
| | IV | 1.30 | 0.180 | 0.359 | 0.359 | 0.437 | 0.350 | 0.254 | 0.377 | 0.214 |
| COEFICIENTE "S" (NSR-98) | | | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| VALOR PICO Sa(g) | | | 1.072 | 2.239 | 1.861 | 2.316 | 2.023 | 1.441 | 2.127 | 1.171 |
| SEÑAL Valor pico Sa (g) | | | 3 | 6 | 5 | 6 | 4 | 4 | 3 | 6 |
| Sa(g) máx NSR-98 | | | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| DIFERENCIA Sa(g) | | | 0.164 | 0.417 | 0.415 | 0.672 | 0.389 | 0.075 | 0.475 | 0.055 |
| COMPARACIÓN MÁXIMOS | | | NORMA | PROPUESTO | PROPUESTO | PROPUESTO | PROPUESTO | PROPUESTO | PROPUESTO | NORMA |
| PORCENTAJE INCREMENTO | | | 21.863 | 35.707 | 35.649 | 47.240 | 34.144 | 9.096 | 38.769 | 7.356 |

| SECTOR | | | FACARTES | FACING | INEM | JAVEPRI | LAPAZ | MORA | NUEVOJAV | PANDIACO |
|----------------------------|-----|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Sa(g) máx - PGA | | | 0.926 | 0.805 | 1.543 | 1.314 | 1.091 | 1.115 | 1.519 | 0.804 |
| COEFICIENTE DE IMPORTANCIA | I | 1.00 | 0.371 | 0.322 | 0.617 | 0.526 | 0.436 | 0.446 | 0.608 | 0.321 |
| | II | 1.10 | 0.337 | 0.293 | 0.561 | 0.478 | 0.397 | 0.406 | 0.552 | 0.292 |
| | III | 1.20 | 0.309 | 0.268 | 0.514 | 0.438 | 0.364 | 0.372 | 0.506 | 0.268 |
| | IV | 1.30 | 0.285 | 0.248 | 0.475 | 0.404 | 0.336 | 0.343 | 0.467 | 0.247 |
| COEFICIENTE "S" (NSR-98) | | | 1.5 | 1.2 | 1.2 | 1.5 | 1.2 | 1.5 | 1.2 | 1.5 |
| VALOR PICO Sa(g) | | | 1.501 | 1.381 | 3.077 | 2.449 | 1.669 | 1.890 | 2.721 | 1.404 |
| SEÑAL Valor pico Sa (g) | | | 6 | 4 | 6 | 5 | 4 | 6 | 6 | 4 |
| Sa(g) máx NSR-98 | | | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| DIFERENCIA Sa(g) | | | 0.176 | 0.055 | 0.793 | 0.564 | 0.341 | 0.365 | 0.769 | 0.054 |
| COMPARACIÓN MÁXIMOS | | | PROPUESTO | PROPUESTO | PROPUESTO | PROPUESTO | PROPUESTO | PROPUESTO | PROPUESTO | PROPUESTO |
| PORCENTAJE INCREMENTO | | | 19.048 | 6.798 | 51.407 | 42.922 | 31.265 | 32.759 | 50.627 | 6.685 |

| SECTOR | | | PEDAGOG | PLAZA | POTRE | PQINF | SENA | TEJAR | VALLE |
|----------------------------|-----|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Sa(g) máx - PGA | | | 1.161 | 1.400 | 1.221 | 1.390 | 1.597 | 1.723 | 1.065 |
| COEFICIENTE DE IMPORTANCIA | I | 1.00 | 0.464 | 0.560 | 0.488 | 0.556 | 0.639 | 0.689 | 0.426 |
| | II | 1.10 | 0.422 | 0.509 | 0.444 | 0.505 | 0.581 | 0.627 | 0.387 |
| | III | 1.20 | 0.387 | 0.467 | 0.407 | 0.463 | 0.532 | 0.574 | 0.355 |
| | IV | 1.30 | 0.357 | 0.431 | 0.376 | 0.428 | 0.491 | 0.530 | 0.328 |
| COEFICIENTE "S" (NSR-98) | | | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.2 | 1.5 |
| VALOR PICO Sa(g) | | | 2.217 | 2.269 | 2.292 | 2.238 | 3.013 | 3.083 | 1.963 |
| SEÑAL Valor pico Sa (g) | | | 6 | 6 | 5 | 5 | 6 | 4 | 5 |
| Sa(g) máx NSR-98 | | | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| DIFERENCIA Sa(g) | | | 0.411 | 0.650 | 0.471 | 0.640 | 0.847 | 0.973 | 0.315 |
| COMPARACIÓN MÁXIMOS | | | PROPUESTO | PROPUESTO | PROPUESTO | PROPUESTO | PROPUESTO | PROPUESTO | PROPUESTO |
| PORCENTAJE INCREMENTO | | | 35.412 | 46.431 | 38.570 | 46.038 | 53.032 | 56.480 | 29.578 |

Figura 8.7. Resultados de A_a para cada coeficiente de importancia y datos de interés para cada uno de los perfiles en análisis.

Una vez establecidos todos los parámetros necesarios para el cálculo del espectro elástico de diseño a partir de la formulación prescrita por la NSR-98, tales como, coeficiente de Importancia (I), coeficiente de Sitio (S) y Aceleración pico efectiva (A_a), se muestra como resultado la gráfica del espectro elástico de diseño para cada uno de los perfiles en análisis. Un ejemplo se muestra en la figura 8.8.

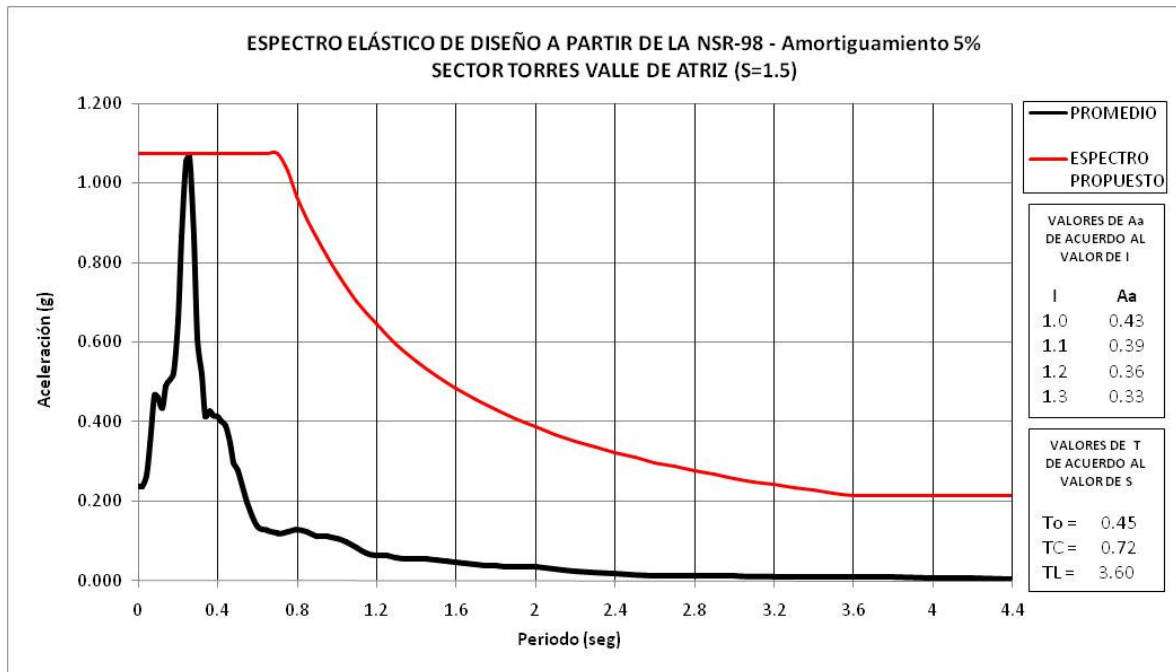


Figura 8.8. Espectro elástico de diseño a partir de la NSR-98 – Amortiguamiento 5%, Sector Torres Valle de Atriz ($S=1,5$)

8.2 CÁLCULO DE ESPECTROS DE DISEÑO EN FUNCIÓN DE LAS CONDICIONES LOCALES Y NIVEL DE INTENSIDAD SÍSMICA²⁸

La información correspondiente a los efectos de sitio ha aumentado considerablemente en los últimos 10 años, debido a la mayor cantidad de registros de un mismo sismo en una gama muy amplia de condiciones geotécnicas y distancias epicentrales. Esta información ha permitido establecer que los periodos de máxima amplificación de la respuesta en superficie de un depósito son afectados por el contenido frecuencial del movimiento. Es decir, dicho periodo será distinto si el perfil es exitado por un terremoto cercano o por uno lejano. Todo esto sugiere la complejidad implícita en la definición de los perfiles geotécnicos y pone en evidencia lo limitadas que resultan las descripciones en la norma de diseño y construcción sismoresistente NSR-98.

A pesar del incremento en el número de registros de terremotos reales, el trabajo para la tipificación de los perfiles debe utilizar también los espectros obtenidos a partir de la aplicación de métodos que permiten estimar la respuesta dinámica de los depósitos de los

²⁸ ECHEZURÍA, Heriberto. Diseño Sismorresistente, especificaciones y criterios empleados en Venezuela – Volumen XXXIII, Academia de Ciencias Físicas Matemáticas y naturales. 1997. 91 p

suelos. Entre estos existen los semiempíricos y los analíticos. Adicionalmente, entre los analíticos, algunos consideran el modelaje del suelo como equivalente-lineal y otros como no lineal. La ventaja del uso de estos modelos es que los mismos permiten anticipar los patrones de respuesta esperados para condiciones sobre las cuales no existe información (tanto desde el punto de vista del sismo como del perfil) o que presentan características muy particulares. Las versiones más modernas de dichos modelos incorporan otros aspectos secundarios que modifican el comportamiento del suelo, como por ejemplo, el incremento de las presiones en el agua intersticial durante el sismo, aunque todavía son de muy reciente desarrollo y no están disponibles para su uso masivo.

El uso de esos métodos de análisis ha permitido mejorar la tipificación de las formas espectrales normalizadas y ampliar las descripciones de los perfiles geotécnicos. Es importante destacar que la respuesta de los perfiles, aunque está muy ligada a la geometría del depósito y a las propiedades del suelo, también varía con otros factores inherentes al sismo y a la corteza tales como la intensidad, la distancia, la topografía, la direccionalidad de la ruptura, el mecanismo en la fuente entre otras.

Para el cálculo de espectros de diseño, se han tomado en cuenta algunos de los aspectos antes mencionados, en relación con las formas espectrales normalizadas, y se han realizado varios trabajos (tabla 8.7) para tipificar la respuesta de los perfiles geotécnicos.

| CLASIFICACIÓN DE LOS PERFILES Y LAS FORMAS ESPECTRALES CONSIDERANDO EL EFECTO DE SITIO | | | | | | | |
|--|--|-----------------------------|-------------------------------------|------|-----|------|------|
| Vs (m/s) | Descripción del material del suelo | Espesor sobre la roca H (m) | Aceleración máxima en la superficie | | | | |
| | | | ≤0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.25 | ≥0.3 |
| > 750 | Roca | N/A | S1 | S1 | S1 | S1 | S1 |
| 280 - 750 | Suelos muy duros o densos | N/A | S1 | S1 | S1 | S1 | S1 |
| 210 - 280 | Suelos duros o densos | < 20 | S1 | S1 | S1 | S1 | S1 |
| | | 20 - 40 | S2 | S2 | S2 | S2 | S2 |
| | | > 40 | S3 | S3 | S3 | S3 | S3 |
| 170 - 210 | Suelos firmes o medianamente densos | N/A | S3 | S3 | S3 | S3 | S3 |
| < 170 | Suelos blandos o sueltos | < 12 (a) | S3 | S3 | S2 | S2 | S2 |
| | | < 12 (b) | - | - | S3 | S3 | S2 |
| | | >12 (a) | S4 | S4 | S3 | S3 | S3 |
| | | >12 (b) | - | - | S4 | S4 | S4 |
| | Estratos blandos intercalados con otros suelos más rígidos | N/A | S3 | S3 | S3 | S3 | S3 |

a) Distancias epicentrales cortas < 100 km., utilizar la aceleración del mapa de zonificación.

b) Distancias epicentrales largas ≥ 100 km., utilizar la aceleración representativa para esta condición.

Tabla 8.4. Clasificación de los perfiles y las formas espectrales considerando el efecto de sitio²⁹

En los Estados Unidos, la definición de los espectros elásticos para diseño se basa en una forma espectral única para roca que es modificada por dos factores de amplificación, F_a y F_v , los cuales dependen del tipo del perfil. El factor F_a aplica para los periodos cortos y F_v para periodos largos. Es importante destacar que el espectro propuesto para roca en los EEUU tiene la misma amplificación máxima que la establecida en la NSR-98 para

²⁹ Ibid., p.142.

Colombia. En la figura 8.9 se ilustra esquemáticamente el procedimiento para obtener el espectro correspondiente a un perfil a partir de aquel correspondiente a la roca.

Los factores F_a y F_v , han sido correlacionados con la velocidad de ondas de corte en perfiles de profundidades mayores a 100 pies, por lo que el procedimiento también sugiere un método para calcular la velocidad promedio ponderada hasta dichas profundidades. El espectro para diseño utiliza los valores más pequeños obtenidos de la multiplicación de las ordenadas del espectro en roca por los factores.

Los valores de F_a y F_v se dan en las tablas 8.8 y 8.9, respectivamente. Nótese que a medida que los suelos presentes en el perfil se hacen menos rígidos, de A a D, lo cual equivale a decir de S_1 a S_4 , los dos factores aumentan significativamente.

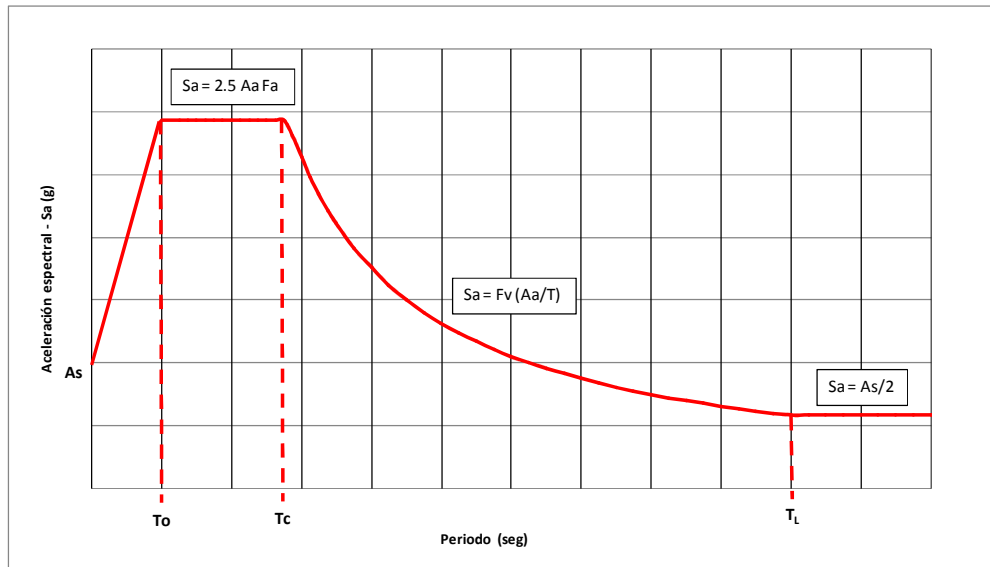


Figura 8.9. Proceso esquemático para obtener el espectro de un perfil de suelo

| VALORES DE F_a EN FUNCIÓN DE LAS CONDICIONES LOCALES Y NIVEL DE INTENSIDAD SÍSMICA | | | | | |
|--|------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| Clasificación del sitio | Nivel de intensidad $A_a(g)$ | | | | |
| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 |
| A_a | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| A | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| B | 1.2 | 1.2 | 1.1 | 1 | 1 |
| C | 1.6 | 1.4 | 1.2 | 1.1 | 1 |
| D | 2.5 | 1.7 | 1.2 | 0.9 | - |

- Investigación específica con respuesta dinámica

Tabla 8.5. Valores de F_a en función de las condiciones locales y nivel de intensidad sísmica.³⁰

³⁰ Ibid., p.142.

| VALORES DE F_v EN FUNCIÓN DE LAS CONDICIONES LOCALES Y NIVEL DE INTENSIDAD SÍSMICA | | | | | |
|--|------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| Clasificación del sitio | Nivel de intensidad $A_v(g)$ | | | | |
| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 |
| Av | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| A | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| B | 1.7 | 1.6 | 1.5 | 1.4 | 1.3 |
| C | 2.4 | 2 | 1.8 | 1.6 | 1.5 |
| D | 3.5 | 3.2 | 2.8 | 2.4 | - |

- Investigación específica con respuesta dinámica

Tabla 8.6. Valores de F_v en función de las condiciones locales y nivel de intensidad sísmica.³¹

Una vez se conocen los valores de F_a y F_v para cada nivel de intensidad, se asigna a cada tipo de perfil de suelo una velocidad de ondas de corte (V_s), de acuerdo al capítulo A.2 literal A.2.4.1 de la NSR-98, como se muestra en la tabla 8.10.

| COEFICIENTE | V_s (m/s) |
|-------------|-------------|
| S1 (A) | 750 |
| S2 (B) | 400 |
| S3 (C) | 270 |
| S4 (D) | 150 |

Tabla 8.7. Velocidad de ondas de corte de acuerdo al coeficiente de sitio S (NSR-98).

Para conocer el comportamiento de los valores de F_a y F_v para los diferentes niveles de intensidad sísmica, se procedió a graficar cada uno de ellos respecto a la velocidad de ondas de corte V_s (m/s) para cada coeficiente de sitio (S_1 a S_4), obteniendo para cada una de las gráficas su ecuación, con factores de correlación mayores a 0.997. Ver figuras 8.10 a 8.13

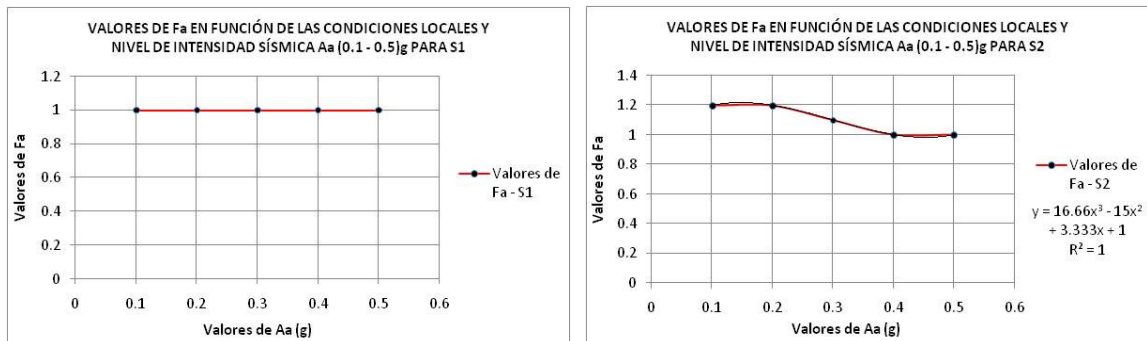


Figura 8.10. Valores de F_a en función de las condiciones locales y nivel de intensidad sísmica para cada tipo de perfil de suelo (S_1 y S_2).

³¹ Ibid., p.142.

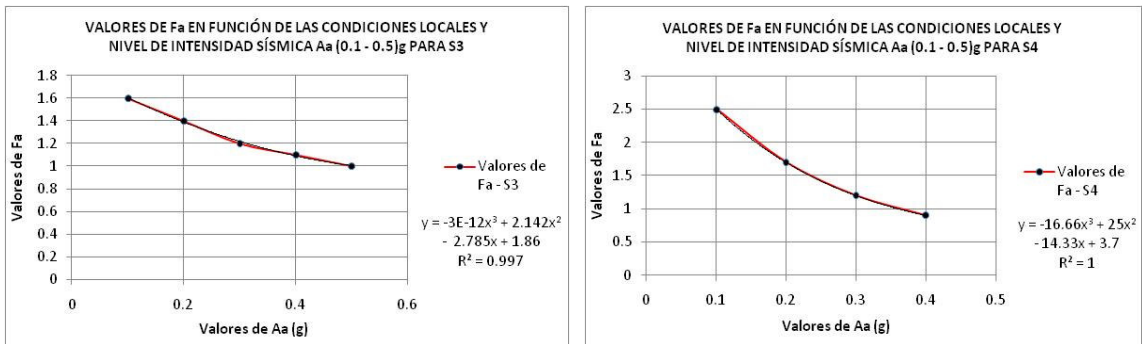


Figura 8.11. Valores de F_a en función de las condiciones locales y nivel de intensidad sísmica para cada tipo de perfil de suelo (S_3 y S_4).

Ecuaciones de F_a para cada tipo de perfil de suelo

$$F_a(S_1) = 1$$

$$F_a(S_2) = 16,66x^3 - 15x^2 + 3,333x + 1$$

$$F_a(S_3) = -3E-12x^3 + 2,142x^2 - 2,785x + 1,86$$

$$F_a(S_4) = -16,66x^3 + 25x^2 - 14,33x + 3,7$$

Siendo $x = A_a$ (g).

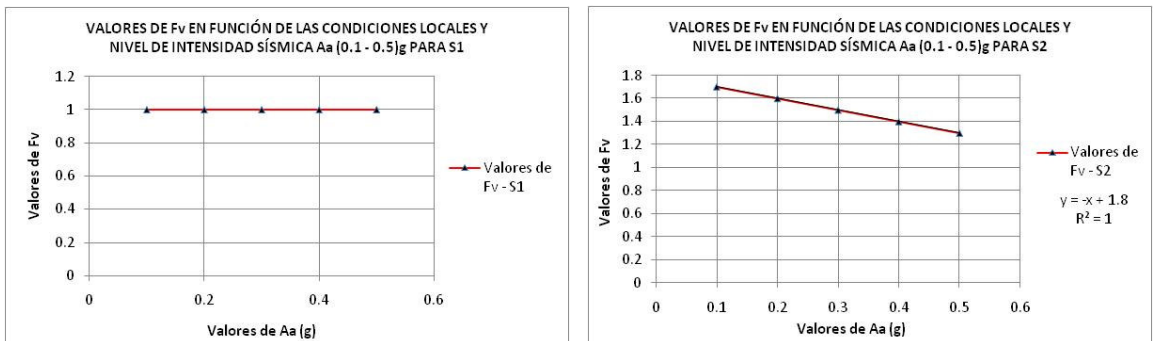


Figura 8.12. Valores de F_v en función de las condiciones locales y nivel de intensidad sísmica para cada tipo de perfil de suelo (S_1 y S_2).

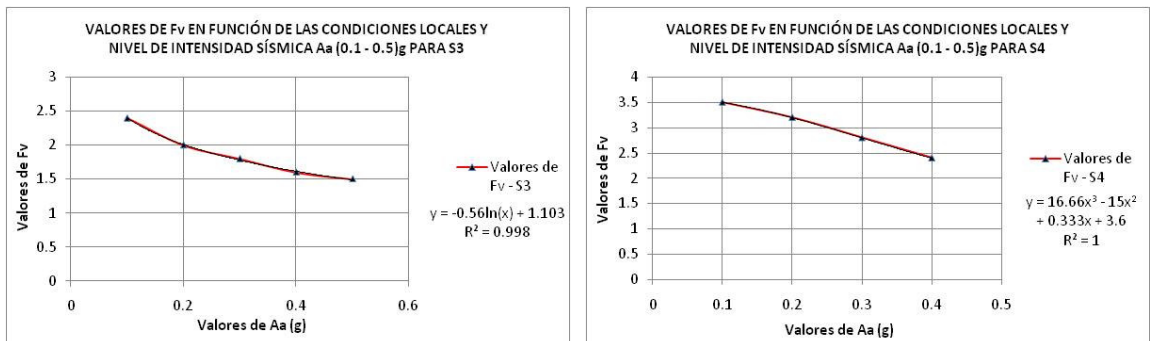


Figura 8.13. Valores de F_v en función de las condiciones locales y nivel de intensidad sísmica para cada tipo de perfil de suelo (S_3 y S_4).

Ecuaciones de F_v para cada tipo de perfil de suelo

$$F_v(S_1) = 1$$

$$F_v(S_2) = -x + 1,8$$

$$F_v(S_3) = -0,56\ln(x) + 1,103$$

$$F_v(S_4) = 16,66x^3 - 15x^2 + 0,333x + 3,6$$

Siendo $x = A_a$ (g).

A partir de estas ecuaciones y con los valores de A_a , que se muestran en la figura 8.7 para un coeficiente de importancia igual a 1, se obtienen los valores de F_a y F_v para cada uno de los perfiles en análisis. Un resumen de estos resultados se puede observar en la figura 8.14 y 8.15

| SECTOR | AQUINE | ARANDA | BETHLE | COLELIB | DEPTAL | EMPOCENT | EMPOMIJI | ESTADIO | FACARTES |
|--------|--------|--------|---------|---------|--------|----------|----------|---------|----------|
| Aa | 0.234 | 0.467 | 0.466 | 0.569 | 0.456 | 0.330 | 0.490 | 0.278 | 0.371 |
| S1 (A) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| S2 (B) | 1.172 | 0.982 | 0.982 | 1.108 | 0.980 | 1.065 | 0.992 | 1.125 | 1.023 |
| S3 (C) | 1.325 | 1.027 | 1.027 | 0.969 | 1.036 | 1.174 | 1.010 | 1.251 | 1.122 |
| S4 (D) | 1.500 | 0.764 | 0.765 | 0.572 | 0.785 | 1.095 | 0.721 | 1.291 | 0.975 |
| SECTOR | FACING | INEM | JAVEPRI | LAPAZ | MORA | NUEVOJAV | PANDIACO | PEDAGOG | PLAZA |
| Aa | 0.322 | 0.617 | 0.526 | 0.436 | 0.446 | 0.608 | 0.321 | 0.464 | 0.560 |
| S1 (A) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| S2 (B) | 1.074 | 1.261 | 1.027 | 0.982 | 0.981 | 1.225 | 1.075 | 0.981 | 1.088 |
| S3 (C) | 1.185 | 0.957 | 0.988 | 1.053 | 1.044 | 0.959 | 1.186 | 1.029 | 0.972 |
| S4 (D) | 1.122 | 0.461 | 0.656 | 0.823 | 0.803 | 0.485 | 1.123 | 0.768 | 0.589 |
| SECTOR | POTRE | PQINF | SENA | TEJAR | VALLE | | | | |
| Aa | 0.488 | 0.556 | 0.639 | 0.689 | 0.426 | | | | |
| S1 (A) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | |
| S2 (B) | 0.991 | 1.080 | 1.351 | 1.627 | 0.986 | | | | |
| S3 (C) | 1.011 | 0.974 | 0.955 | 0.958 | 1.062 | | | | |
| S4 (D) | 0.724 | 0.598 | 0.405 | 0.244 | 0.844 | | | | |

Figura 8.14. Valores de F_a para cada perfil en análisis.

| SECTOR | AQUINE | ARANDA | BETHLE | COLELIB | DEPTAL | EMPOCENT | EMPOMIJI | ESTADIO | FACARTES |
|--------|--------|--------|---------|---------|--------|----------|----------|---------|----------|
| Aa | 0.234 | 0.467 | 0.466 | 0.569 | 0.456 | 0.330 | 0.490 | 0.278 | 0.371 |
| S1 (A) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| S2 (B) | 1.566 | 1.333 | 1.334 | 1.231 | 1.344 | 1.470 | 1.310 | 1.522 | 1.429 |
| S3 (C) | 1.915 | 1.530 | 1.530 | 1.419 | 1.543 | 1.724 | 1.503 | 1.820 | 1.659 |
| S4 (D) | 3.068 | 2.182 | 2.183 | 2.002 | 2.214 | 2.675 | 2.122 | 2.892 | 2.511 |
| SECTOR | FACING | INEM | JAVEPRI | LAPAZ | MORA | NUEVOJAV | PANDIACO | PEDAGOG | PLAZA |
| Aa | 0.322 | 0.617 | 0.526 | 0.436 | 0.446 | 0.608 | 0.321 | 0.464 | 0.560 |
| S1 (A) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| S2 (B) | 1.478 | 1.183 | 1.274 | 1.364 | 1.354 | 1.192 | 1.479 | 1.336 | 1.240 |
| S3 (C) | 1.738 | 1.373 | 1.463 | 1.567 | 1.555 | 1.382 | 1.738 | 1.532 | 1.428 |
| S4 (D) | 2.709 | 2.009 | 2.050 | 2.273 | 2.242 | 2.002 | 2.710 | 2.188 | 2.008 |
| SECTOR | POTRE | PQINF | SENA | TEJAR | VALLE | | | | |
| Aa | 0.488 | 0.556 | 0.639 | 0.689 | 0.426 | | | | |
| S1 (A) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | |
| S2 (B) | 1.312 | 1.244 | 1.161 | 1.111 | 1.374 | | | | |
| S3 (C) | 1.504 | 1.432 | 1.354 | 1.311 | 1.581 | | | | |
| S4 (D) | 2.126 | 2.012 | 2.034 | 2.159 | 2.308 | | | | |

Figura 8.15. Valores de F_v para cada perfil en análisis.

A partir de los datos que se muestran en las figuras 8.14 y 8.15 con respecto a la tabla 8.7 se grafica el comportamiento de los valores de F_a y F_v para cada uno de los perfiles de los sectores en estudio. Un ejemplo se muestra en la figura 8.16. Con ayuda de estas gráficas y para las velocidades de ondas de corte V_s (m/s), establecidas para cada perfil que se muestran en la tabla 8.3 y figura 8.7, se calculan los valores de F_a y F_v que se usarán para el cálculo de los espectros en función de las condiciones locales y nivel de intensidad sísmica.

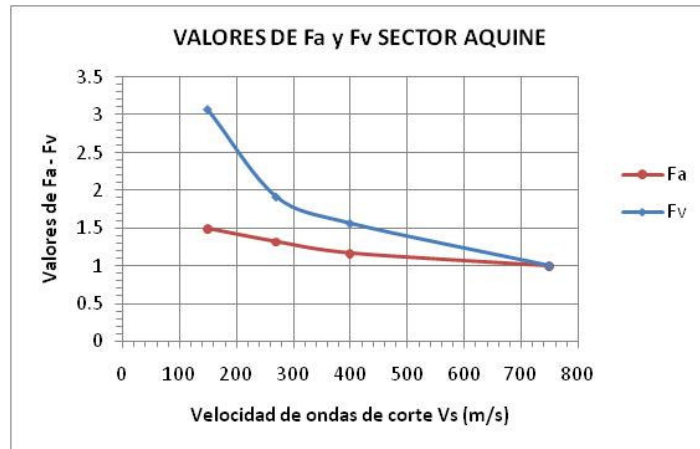


Figura 8.16. Valores de F_a y F_v Sector Aquine.

| | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|---------|---------|--------|----------|----------|---------|----------|
| SECTOR | AQUINE | ARANDA | BETHLE | COLELIB | DEPTAL | EMPOCENT | EMPOMIJI | ESTADIO | FACARTES |
| S | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| Vs | 155.05 | 168.31 | 213.98 | 336.58 | 268.92 | 236.42 | 155.05 | 186.02 | 191.57 |
| Aa | 0.23 | 0.47 | 0.47 | 0.57 | 0.46 | 0.33 | 0.49 | 0.28 | 0.37 |
| As | 0.178 | 0.269 | 0.311 | 0.335 | 0.267 | 0.223 | 0.293 | 0.165 | 0.208 |
| To | 0.100 | 0.070 | 0.050 | 0.050 | 0.070 | 0.090 | 0.095 | 0.150 | 0.055 |
| Tc | 0.821 | 1.038 | 0.810 | 0.503 | 0.595 | 0.692 | 1.143 | 0.803 | 0.866 |
| TL | 8.152 | 7.219 | 5.497 | 4.490 | 5.275 | 5.886 | 7.003 | 8.654 | 7.895 |
| Fa | 1.490 | 0.801 | 0.904 | 1.050 | 1.038 | 1.148 | 0.732 | 1.278 | 1.022 |
| Fv | 3.095 | 2.081 | 1.833 | 1.323 | 1.546 | 1.989 | 2.094 | 2.569 | 2.216 |
| SECTOR | FACING | INEM | JAVEPRI | LAPAZ | MORA | NUEVOJAV | PANDIACO | PEDAGOG | PLAZA |
| S | 1.2 | 1.2 | 1.5 | 1.2 | 1.5 | 1.2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| Vs | 299.1 | 299.1 | 240.61 | 291.41 | 168.31 | 297.51 | 155.05 | 238.34 | 262.66 |
| Aa | 0.32 | 0.62 | 0.53 | 0.44 | 0.45 | 0.61 | 0.32 | 0.46 | 0.56 |
| As | 0.259 | 0.281 | 0.284 | 0.323 | 0.259 | 0.309 | 0.210 | 0.268 | 0.271 |
| To | 0.050 | 0.056 | 0.110 | 0.050 | 0.052 | 0.050 | 0.200 | 0.051 | 0.100 |
| Tc | 0.577 | 0.516 | 0.705 | 0.590 | 1.020 | 0.527 | 0.950 | 0.708 | 0.618 |
| TL | 4.180 | 5.832 | 5.939 | 4.149 | 7.354 | 5.269 | 8.173 | 5.907 | 6.057 |
| Fa | 1.163 | 1.027 | 0.909 | 1.038 | 0.837 | 1.015 | 1.123 | 0.961 | 0.947 |
| Fv | 1.682 | 1.327 | 1.605 | 1.535 | 2.135 | 1.340 | 2.669 | 1.704 | 1.465 |
| SECTOR | POTRE | PQINF | SENA | TEJAR | VALLE | | | | |
| S | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.2 | 1.5 | | | | |
| Vs | 252.22 | 263.43 | 263.43 | 314.23 | 213.98 | | | | |
| Aa | 0.49 | 0.56 | 0.64 | 0.69 | 0.43 | | | | |
| As | 0.248 | 0.263 | 0.308 | 0.302 | 0.237 | | | | |
| To | 0.150 | 0.050 | 0.050 | 0.030 | 0.150 | | | | |
| Tc | 0.658 | 0.615 | 0.596 | 0.417 | 0.802 | | | | |
| TL | 6.275 | 6.180 | 5.754 | 5.669 | 6.905 | | | | |
| Fa | 0.967 | 0.950 | 0.930 | 1.188 | 0.957 | | | | |
| Fv | 1.593 | 1.462 | 1.387 | 1.242 | 1.921 | | | | |

Figura 8.17. Valores de coeficiente de sitio (S), velocidad de ondas de corte (V_s), aceleración pico efectiva (A_a), periodo inicial (T_o), periodo corto (T_c), periodo largo (T_L), F_a y F_v para cada sector.

En la figura 8.17 el valor de S , corresponde al valor del coeficiente de sitio establecido para cada perfil a partir de las velocidades de ondas de corte con respecto a la NSR-98, V_s , es la velocidad de ondas de corte en m/s, A_a , es la aceleración pico efectiva calculada para cada perfil estratigráfico de los sectores en estudio, A_s , fracción de la gravedad calculada a partir del espectro de respuesta promedio, T_o , es el periodo inicial, T_c , es el periodo corto, T_L , es el periodo largo (T_c y T_L calculados a partir de la formulación establecida en el proceso esquemático), F_a y F_v , valores establecidos en función de las condiciones locales y niveles de intensidad sísmica.

Una vez calculados los espectros en función de las condiciones locales y nivel de intensidad sísmica de acuerdo a los valores de A_a calculados para cada uno de los perfiles como se explico anteriormente, se procedió a calcular los espectros para el nivel de intensidad sísmica establecido por la NSR-98 en la ciudad de San Juan de Pasto ($A_a = 0.30g$), de la siguiente manera:

1. Calculo de los valores de F_a y F_v en función de las condiciones locales de acuerdo al nivel de intensidad sísmica. Tablas 8.8 y 8.9 respectivamente.

| Todos los sectores | |
|--------------------|-----|
| Aa | 0.3 |
| S1 (A) | 1 |
| S2 (B) | 1.1 |
| S3 (C) | 1.2 |
| S4 (D) | 1.2 |

Tabla 8.8. Valores de F_a para Nivel de intensidad sísmica ($A_a = 0,30g$)

| Todos los sectores | |
|--------------------|-----|
| Aa | 0.3 |
| S1 (A) | 1 |
| S2 (B) | 1.5 |
| S3 (C) | 1.8 |
| S4 (D) | 2.8 |

Tabla 8.9. Valores de F_v para Nivel de intensidad sísmica ($A_a = 0,30g$)

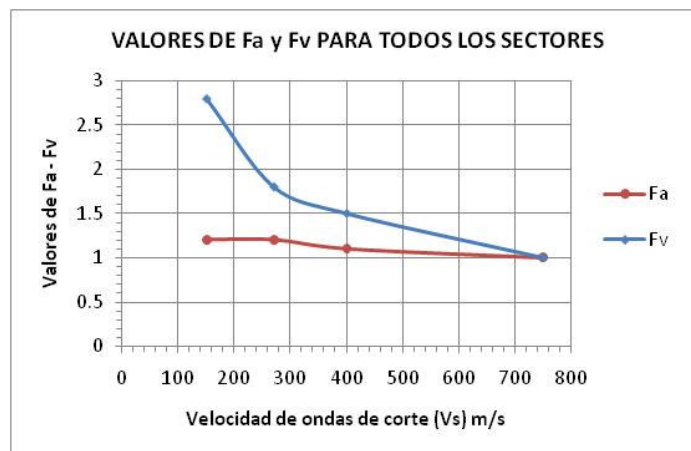


Figura 8.18. Valores de F_a y F_v para todos los sectores con nivel de intensidad sísmica $A_a = 0,30g$

Igual que como se explicó en la figura 8.17, se calculan los valores para determinar el espectro de diseño en función de las condiciones locales para un nivel de intensidad sísmica de $A_a = 0,30g$. Los resultados se muestran en la figura 8.19.

| | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|---------|---------|--------|----------|----------|---------|----------|
| SECTOR | AQUINE | ARANDA | BETHLE | COLELIB | DEPTAL | EMPOCENT | EMPOMIJI | ESTADIO | FACARTES |
| S | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| Vs | 155.05 | 168.31 | 213.98 | 336.58 | 268.92 | 236.42 | 155.05 | 186.02 | 191.57 |
| Aa | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| As | 0.178 | 0.269 | 0.311 | 0.335 | 0.267 | 0.223 | 0.293 | 0.165 | 0.208 |
| To | 0.100 | 0.070 | 0.050 | 0.050 | 0.070 | 0.090 | 0.095 | 0.150 | 0.055 |
| Tc | 0.909 | 0.881 | 0.755 | 0.572 | 0.602 | 0.692 | 0.918 | 0.832 | 0.817 |
| TL | 9.296 | 5.905 | 4.373 | 2.949 | 4.065 | 5.596 | 5.648 | 9.090 | 7.078 |
| Fa | 1.200 | 1.200 | 1.200 | 1.149 | 1.200 | 1.200 | 1.200 | 1.200 | 1.200 |
| Fv | 2.758 | 2.647 | 2.267 | 1.646 | 1.809 | 2.080 | 2.758 | 2.500 | 2.454 |
| SECTOR | FACING | INEM | JAVEPRI | LAPAZ | MORA | NUEVOJAV | PANDIACO | PEDAGOG | PLAZA |
| S | 1.2 | 1.2 | 1.5 | 1.2 | 1.5 | 1.2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| Vs | 299.1 | 299.1 | 240.61 | 291.41 | 168.31 | 297.51 | 155.05 | 238.34 | 262.66 |
| Aa | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| As | 0.259 | 0.281 | 0.284 | 0.323 | 0.259 | 0.309 | 0.210 | 0.268 | 0.271 |
| To | 0.050 | 0.056 | 0.110 | 0.050 | 0.052 | 0.050 | 0.200 | 0.051 | 0.100 |
| Tc | 0.588 | 0.588 | 0.681 | 0.591 | 0.881 | 0.588 | 0.918 | 0.687 | 0.619 |
| TL | 4.014 | 3.700 | 4.320 | 3.252 | 6.133 | 3.372 | 7.880 | 4.620 | 4.121 |
| Fa | 1.178 | 1.178 | 1.200 | 1.184 | 1.200 | 1.179 | 1.200 | 1.200 | 1.200 |
| Fv | 1.733 | 1.733 | 2.045 | 1.751 | 2.647 | 1.737 | 2.758 | 2.064 | 1.861 |
| SECTOR | POTRE | PQINF | SENA | TEJAR | VALLE | | | | |
| S | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.2 | 1.5 | | | | |
| Vs | 252.22 | 263.43 | 263.43 | 314.23 | 213.98 | | | | |
| Aa | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | | | | |
| As | 0.248 | 0.263 | 0.308 | 0.302 | 0.237 | | | | |
| To | 0.150 | 0.050 | 0.050 | 0.030 | 0.150 | | | | |
| Tc | 0.648 | 0.617 | 0.617 | 0.582 | 0.755 | | | | |
| TL | 4.713 | 4.231 | 3.613 | 3.373 | 5.739 | | | | |
| Fa | 1.200 | 1.200 | 1.200 | 1.166 | 1.200 | | | | |
| Fv | 1.948 | 1.855 | 1.855 | 1.698 | 2.267 | | | | |

Figura 8.19. Valores de coeficiente de sitio (S), velocidad de ondas de corte (V_s), periodo inicial (T_o), periodo corto (T_c), periodo largo (T_L), F_a y F_v para cada sector con un nivel de intensidad sísmica de $A_a = 0.30g$.

Una comparación del espectro elástico de diseño calculado a partir de la formulación y los valores recomendados por la NSR-98 tales como aceleración pico efectiva (A_a) = 0,30g, coeficiente de importancia (I) = 1,0 y coeficiente de sitio establecido a partir de las velocidades de ondas de corte con el espectro calculado a partir de la formulación de la norma con base en los resultados obtenidos con el software Proshake y los espectros de diseño en función de las condiciones locales para los niveles de intensidad calculados y el nivel de intensidad recomendado por la NSR-98 para San Juan de Pasto, se muestran en las figuras 8.20 a 8.42.

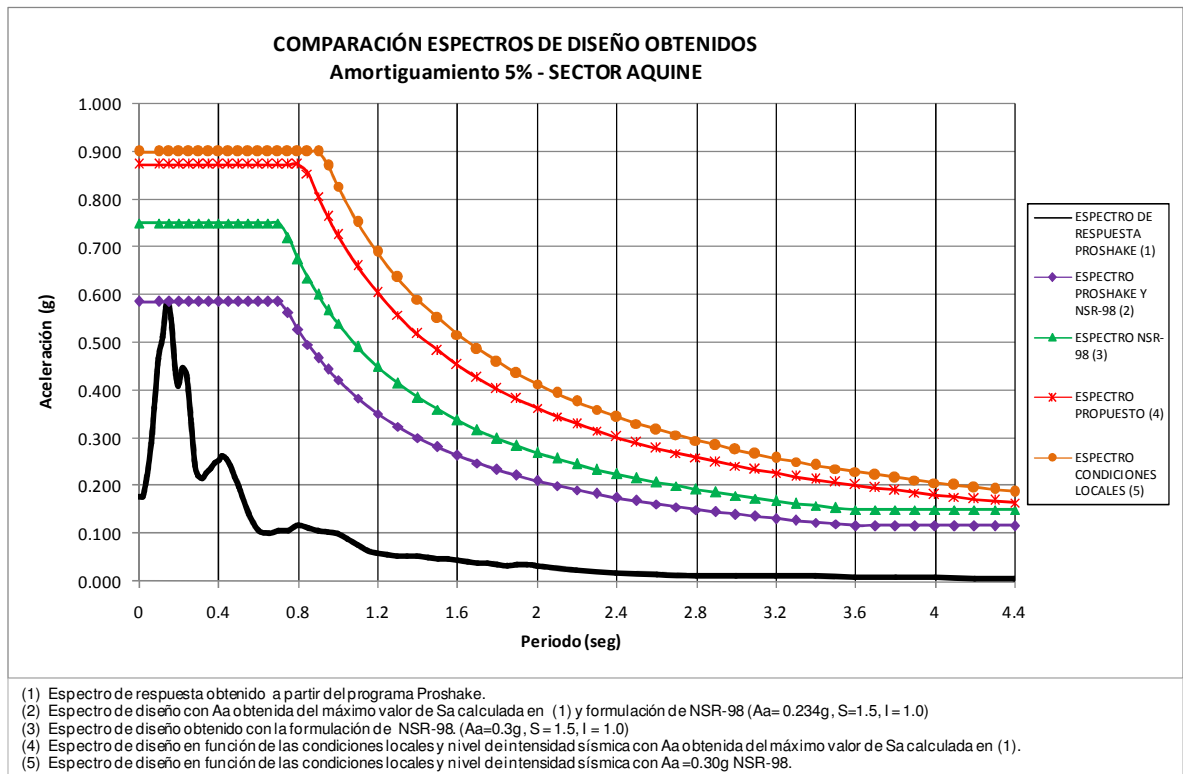


Figura 8.20. Comparación espectros de diseño obtenidos. Sector Aquine.

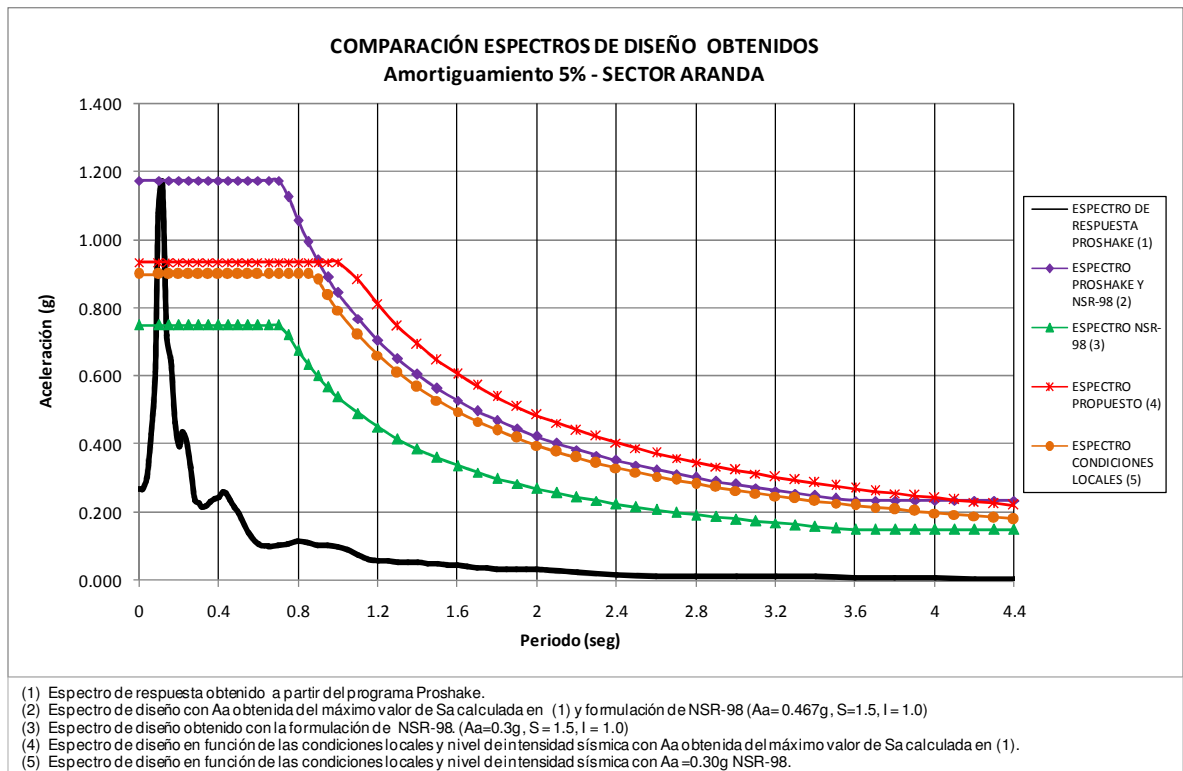


Figura 8.21. Comparación espectros de diseño obtenidos. Sector Aranda.

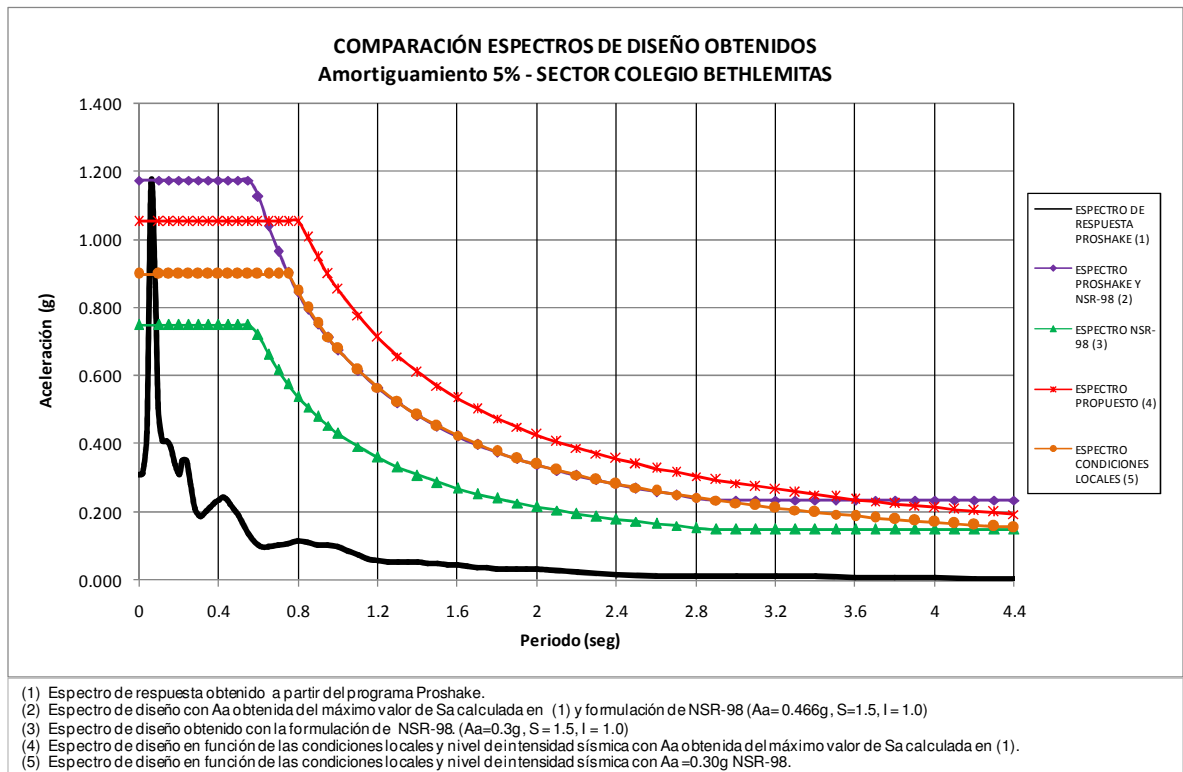


Figura 8.22. Comparación espectros de diseño obtenidos. Sector Colegio Bethlemitas.

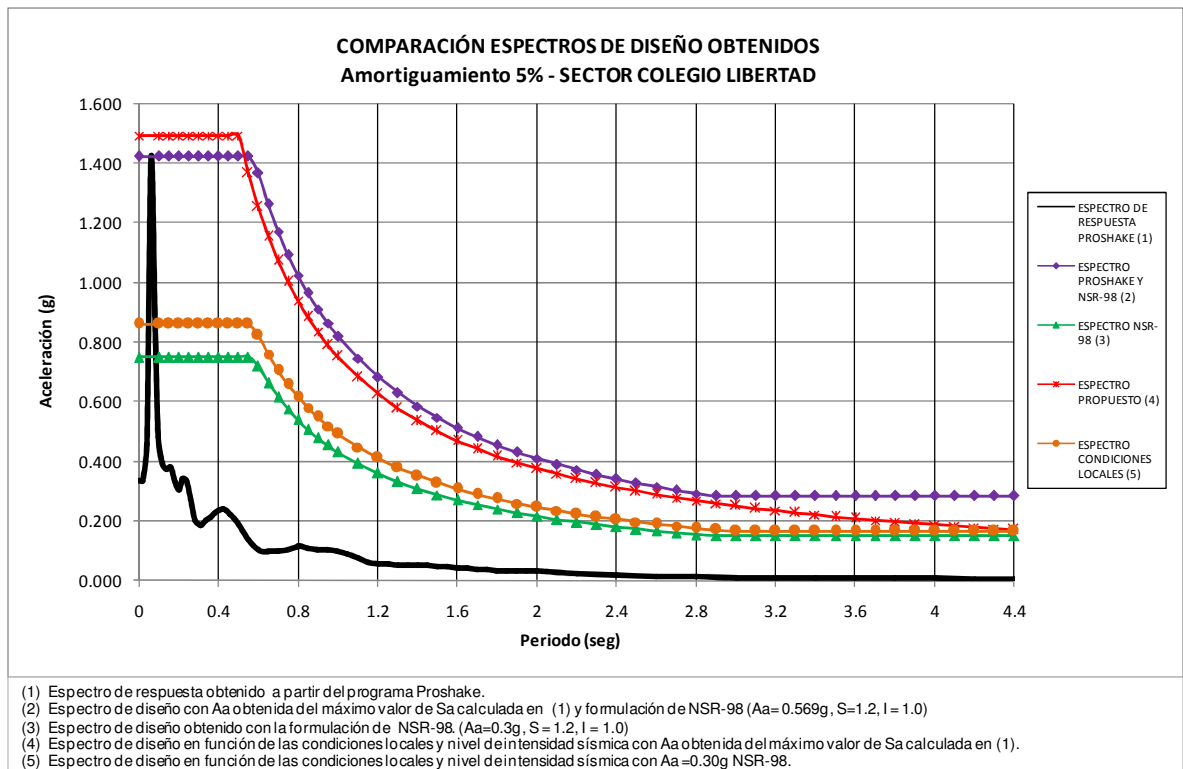


Figura 8.23. Comparación espectros de diseño obtenidos. Sector Colegio Libertad.

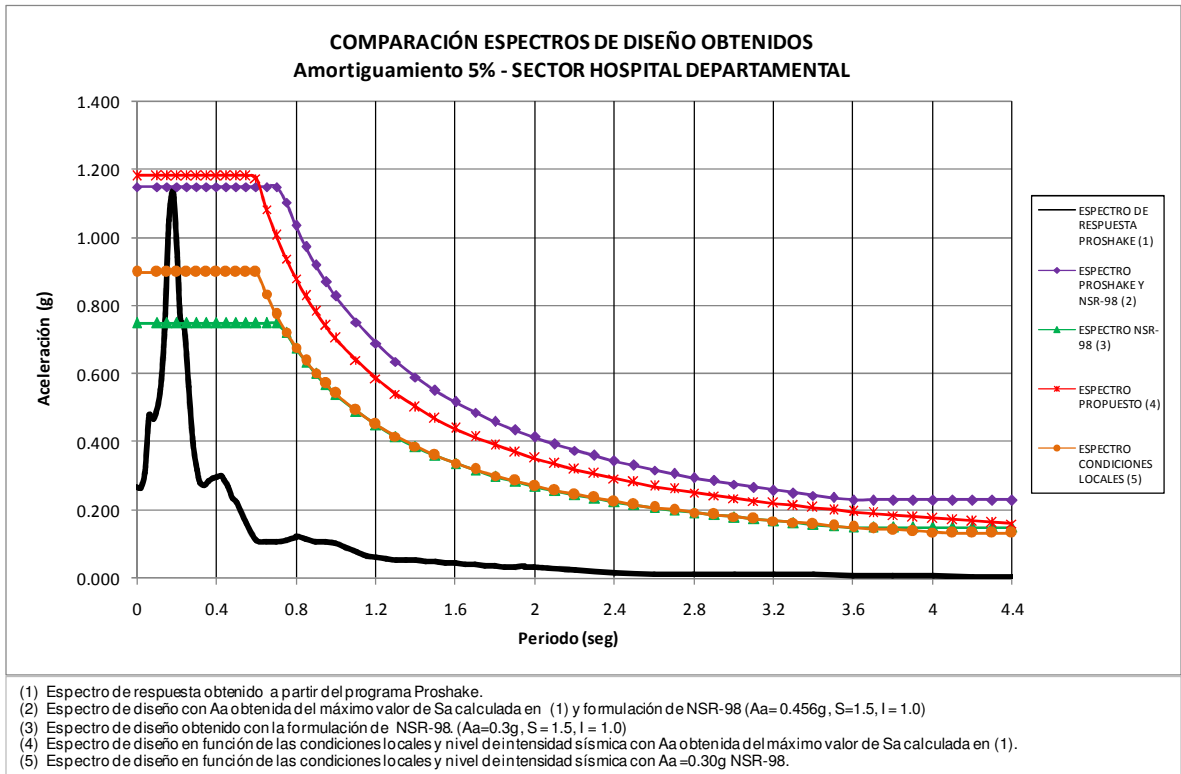


Figura 8.24. Comparación espectros de diseño obtenidos. Sector Hospital Departamental.

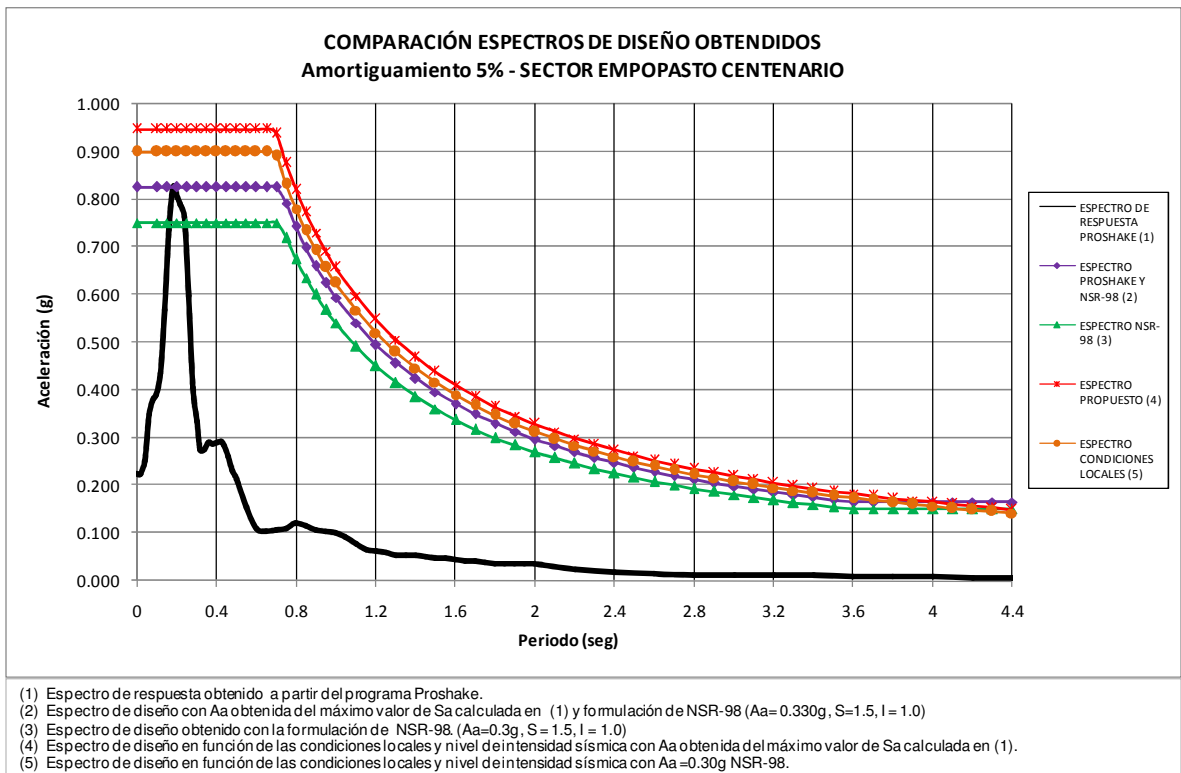


Figura 8.25. Comparación espectros de diseño obtenidos. Sector Empopasto Centenario.

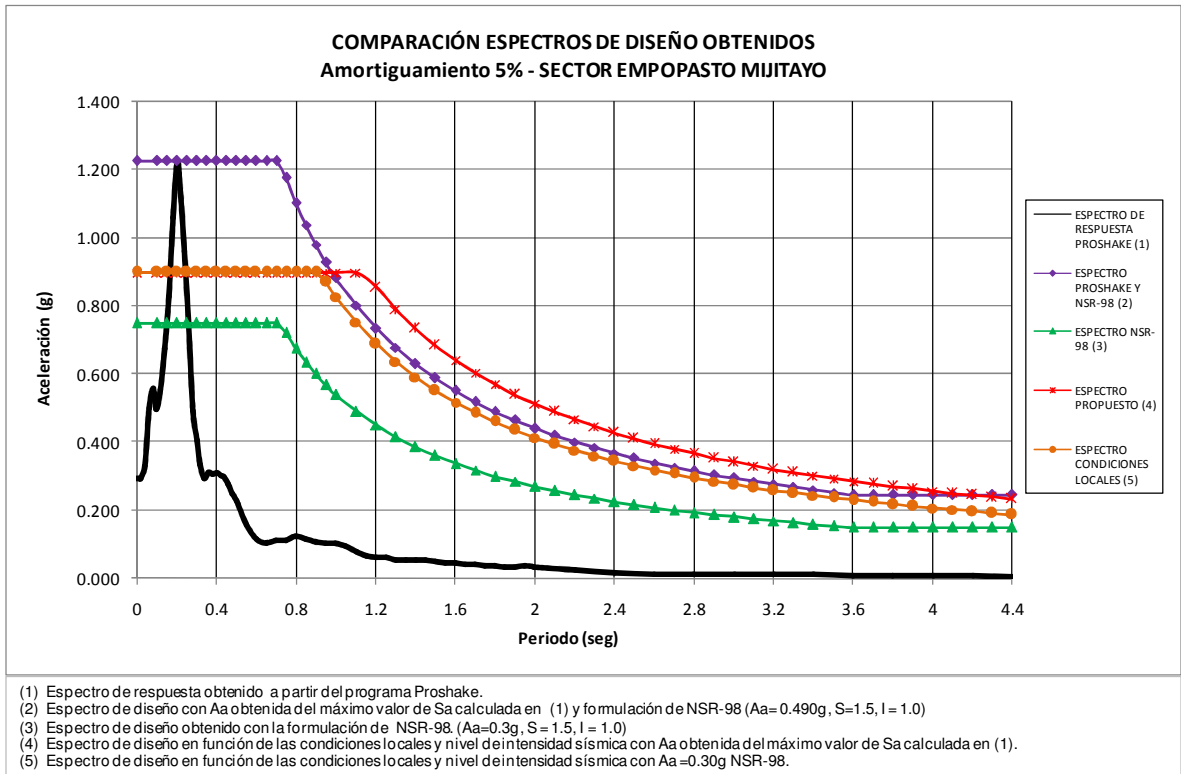


Figura 8.26. Comparación espectros de diseño obtenidos. Sector Empopasto Mijitayo.

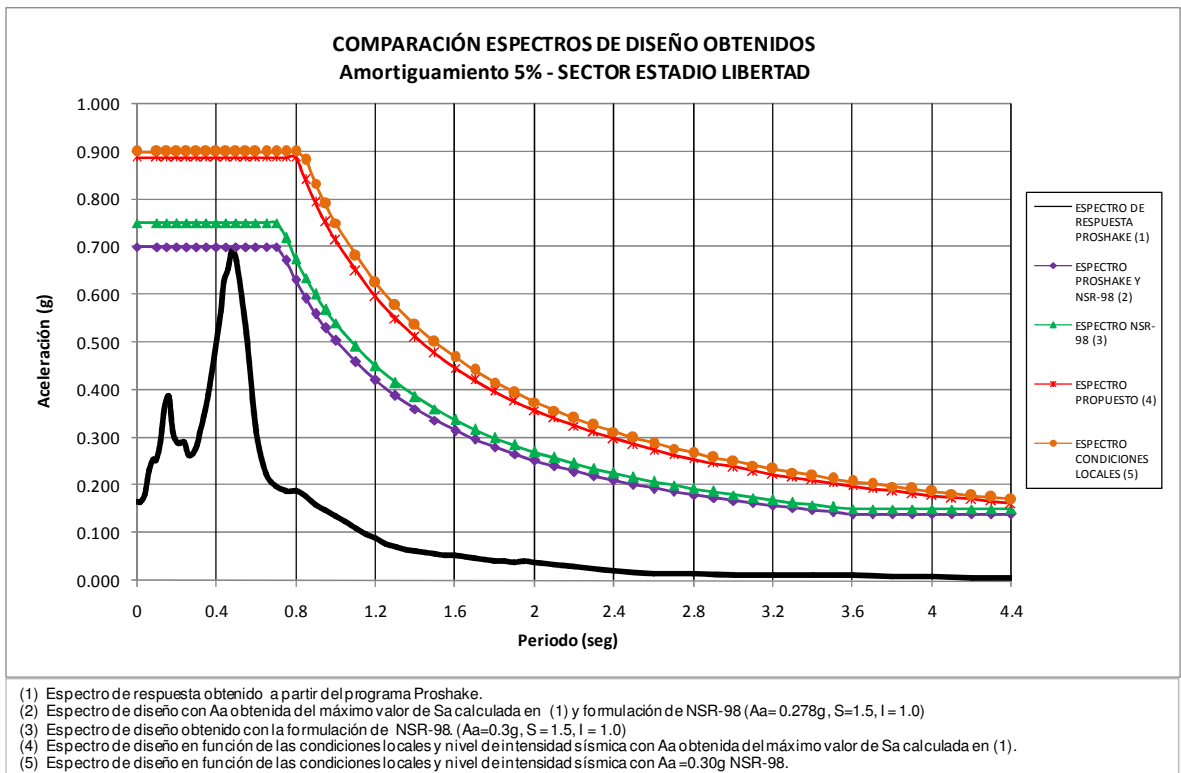


Figura 8.27. Comparación espectros de diseño obtenidos. Sector Estadio Libertad.

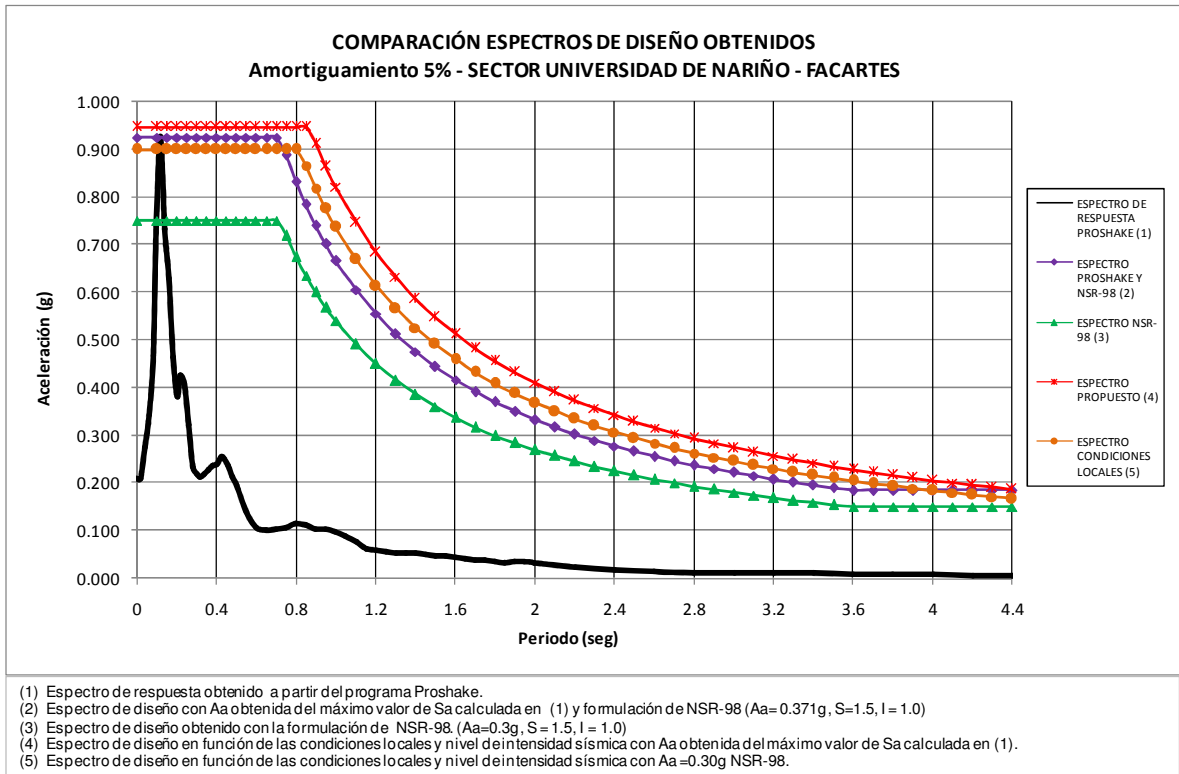


Figura 8.28. Comparación espectros de diseño obtenidos. Sector UDENAR - FACARTES

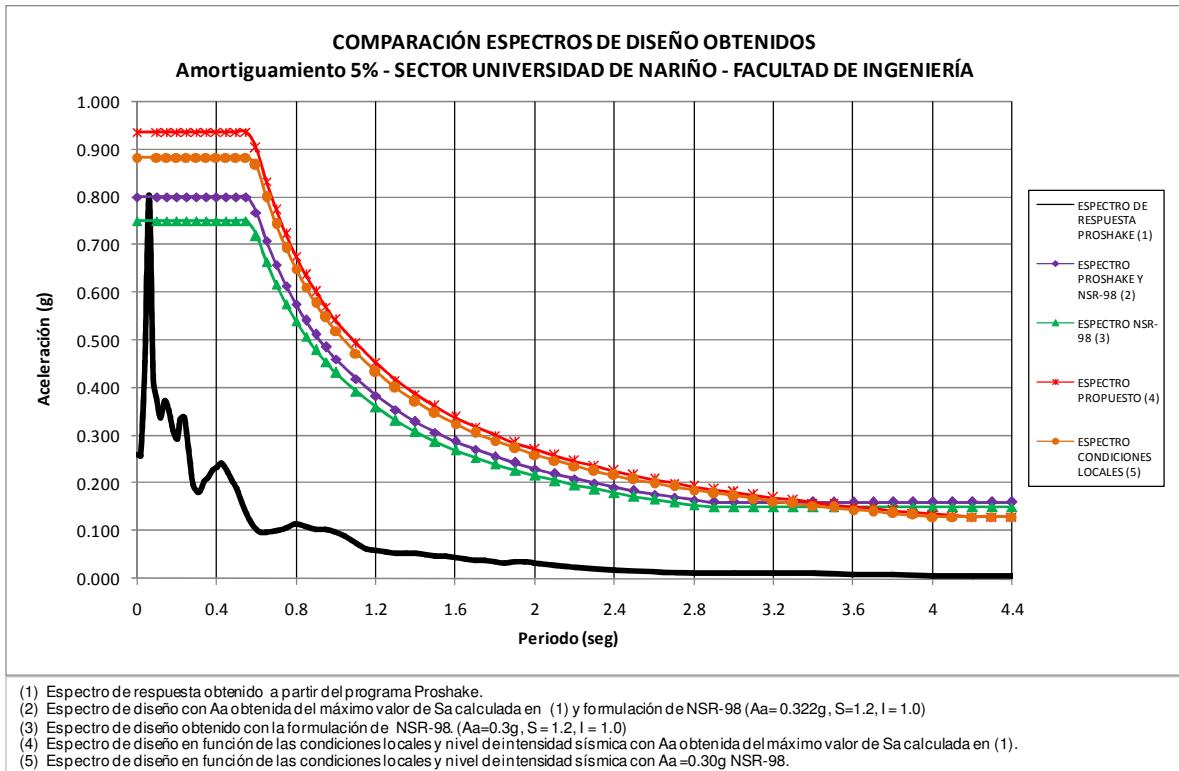


Figura 8.29. Comparación espectros de diseño obtenidos. Sector Universidad de Nariño - Facultad de Ingeniería.

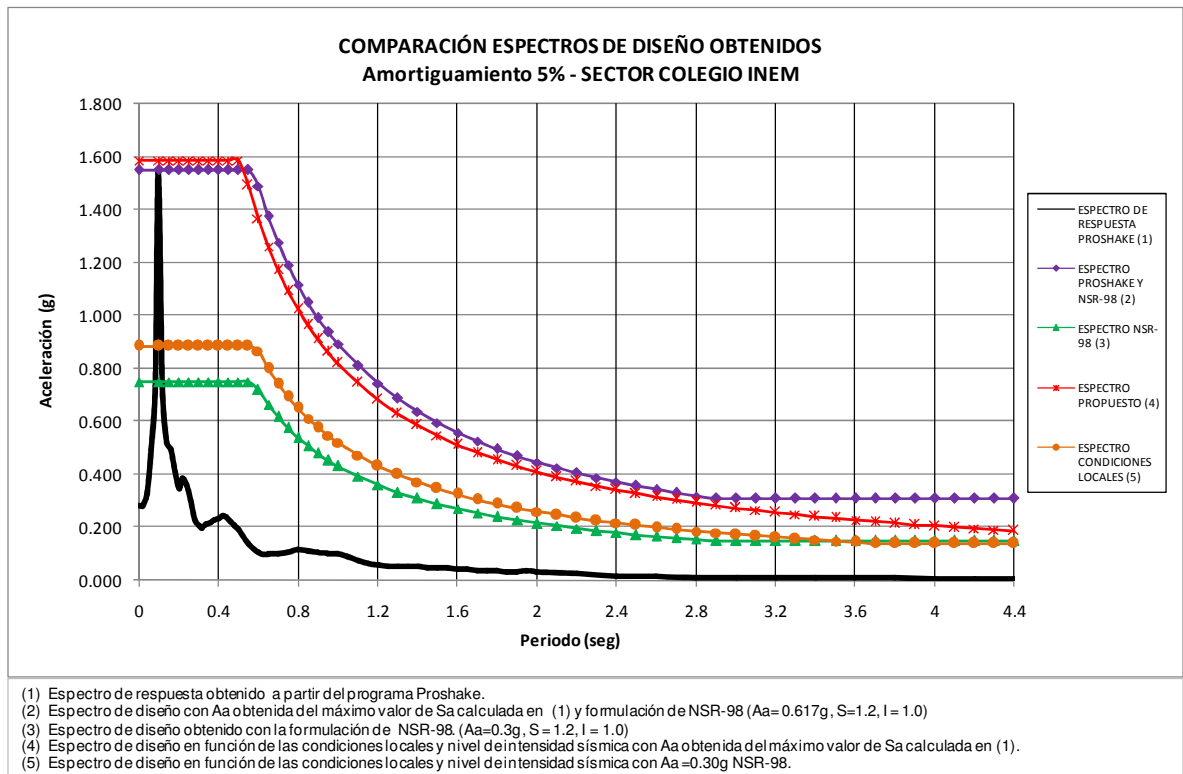


Figura 8.30. Comparación espectros de diseño obtenidos. Sector Colegio INEM.

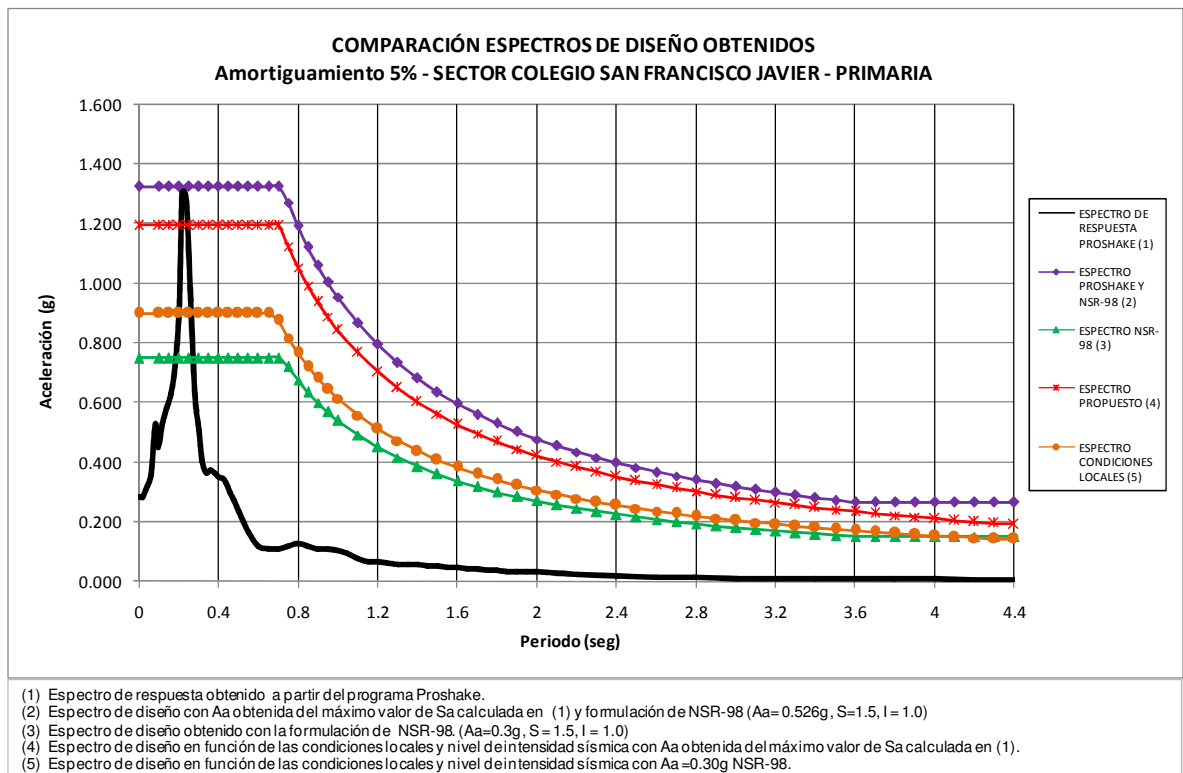


Figura 8.31. Comparación espectros obtenidos. Colegio San Francisco Javier – Primaria.

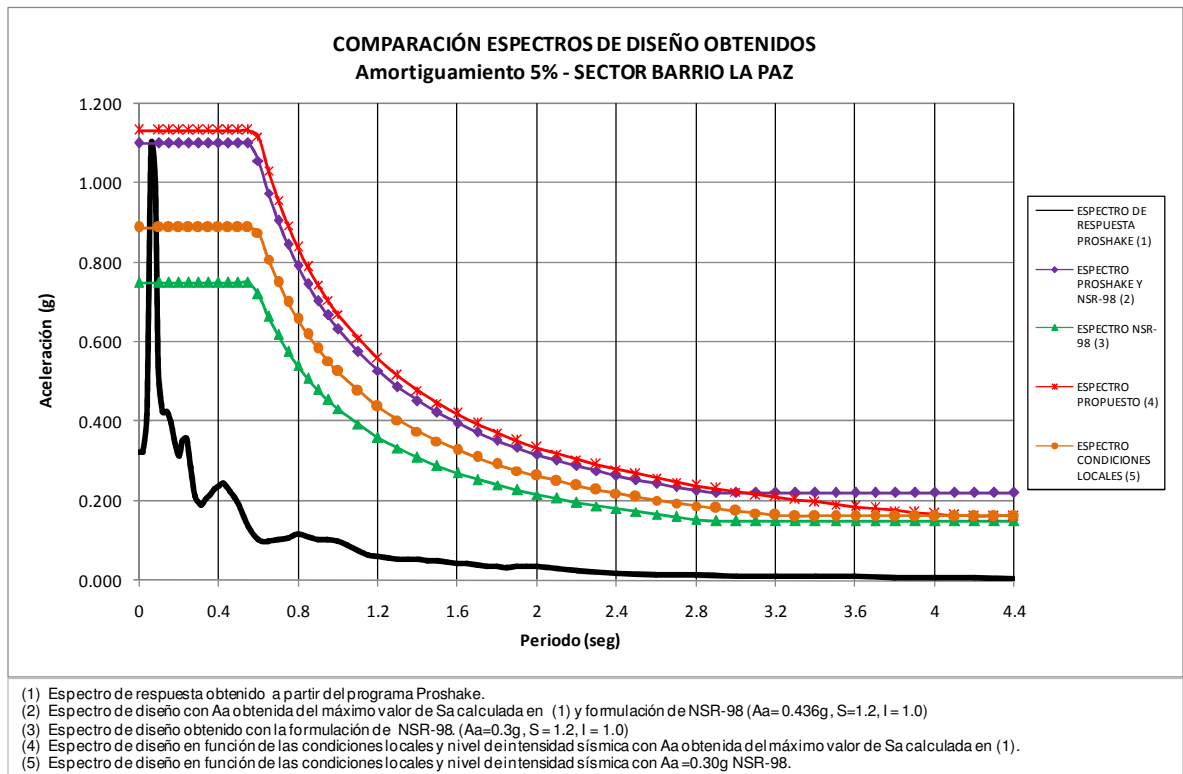


Figura 8.32. Comparación espectros de diseño obtenidos. Sector Barrio La Paz.

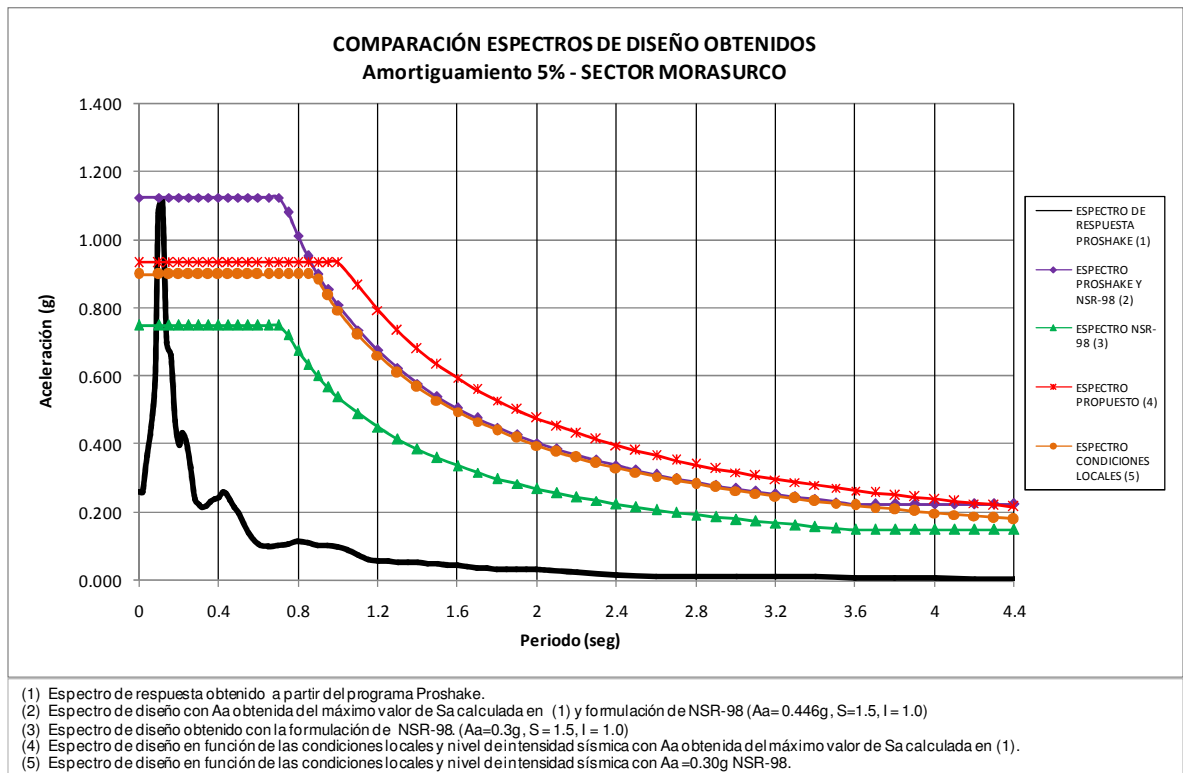


Figura 8.33. Comparación espectros de diseño obtenidos. Sector Morasurco.

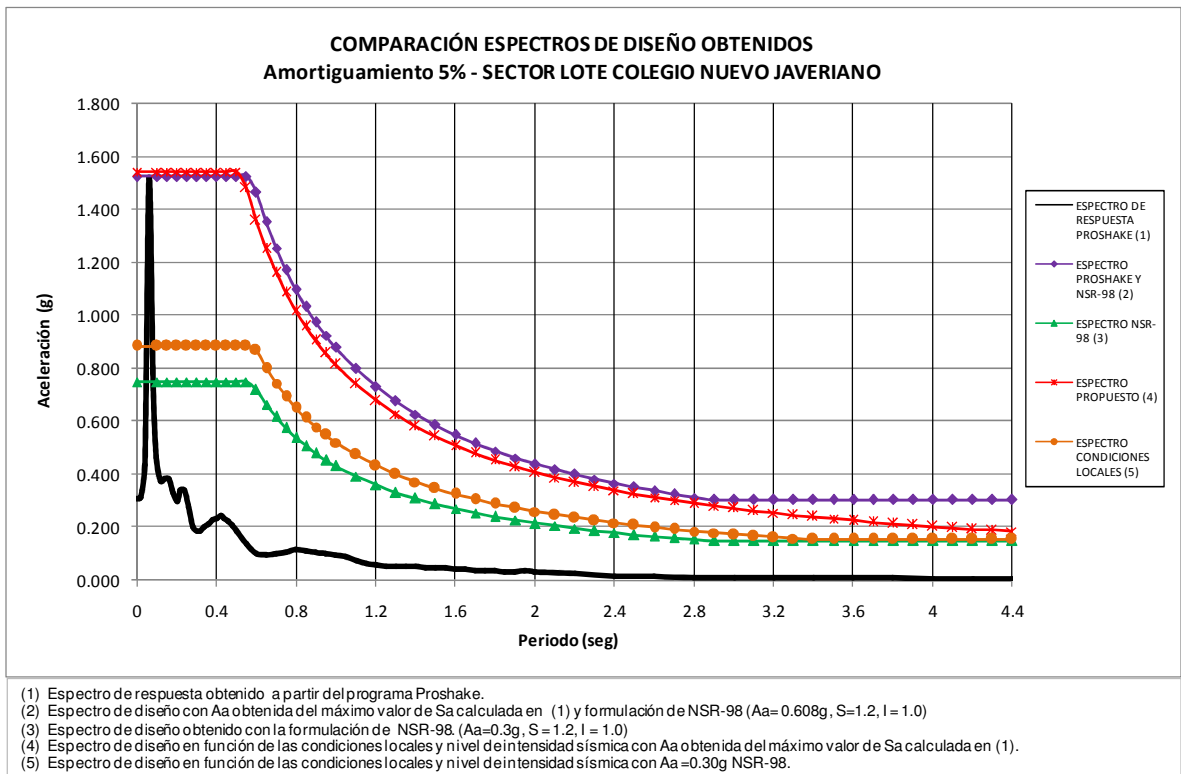


Figura 8.34. Comparación espectros de diseño obtenidos. Sector lote Colegio Nuevo Javeriano.

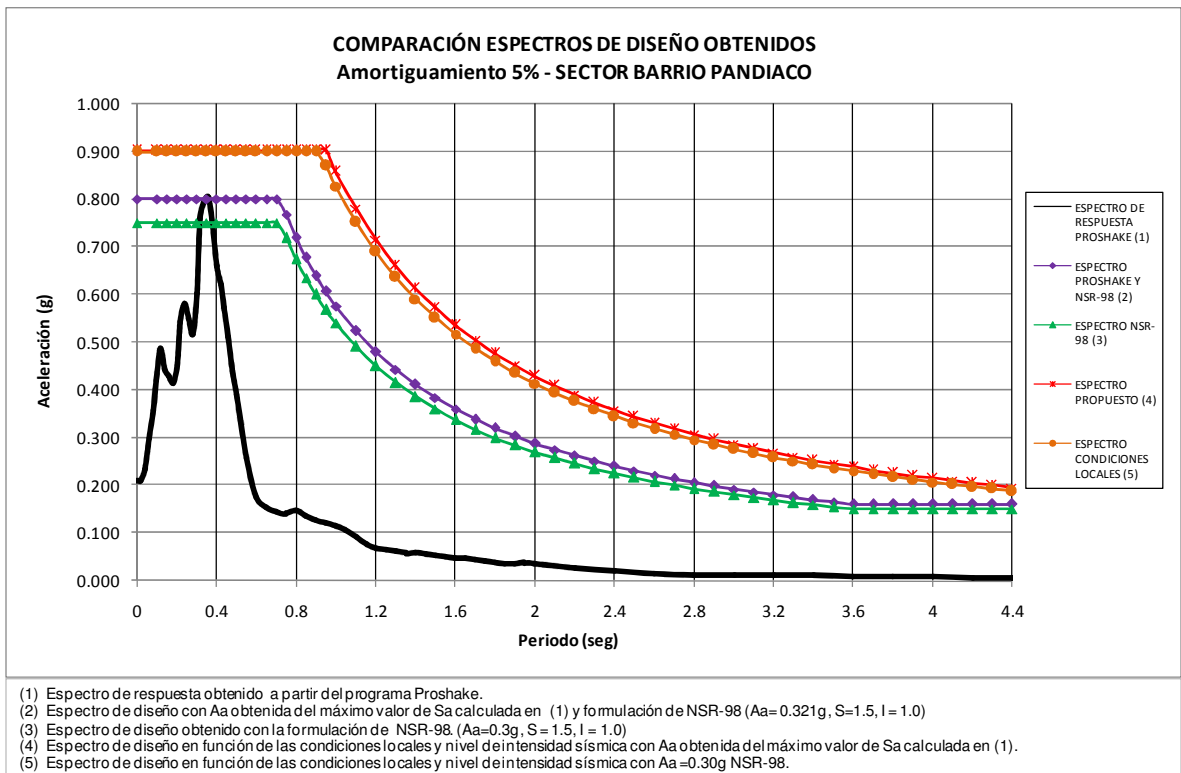


Figura 8.35. Comparación espectros de diseño obtenidos. Sector Barrio Pandiaco.

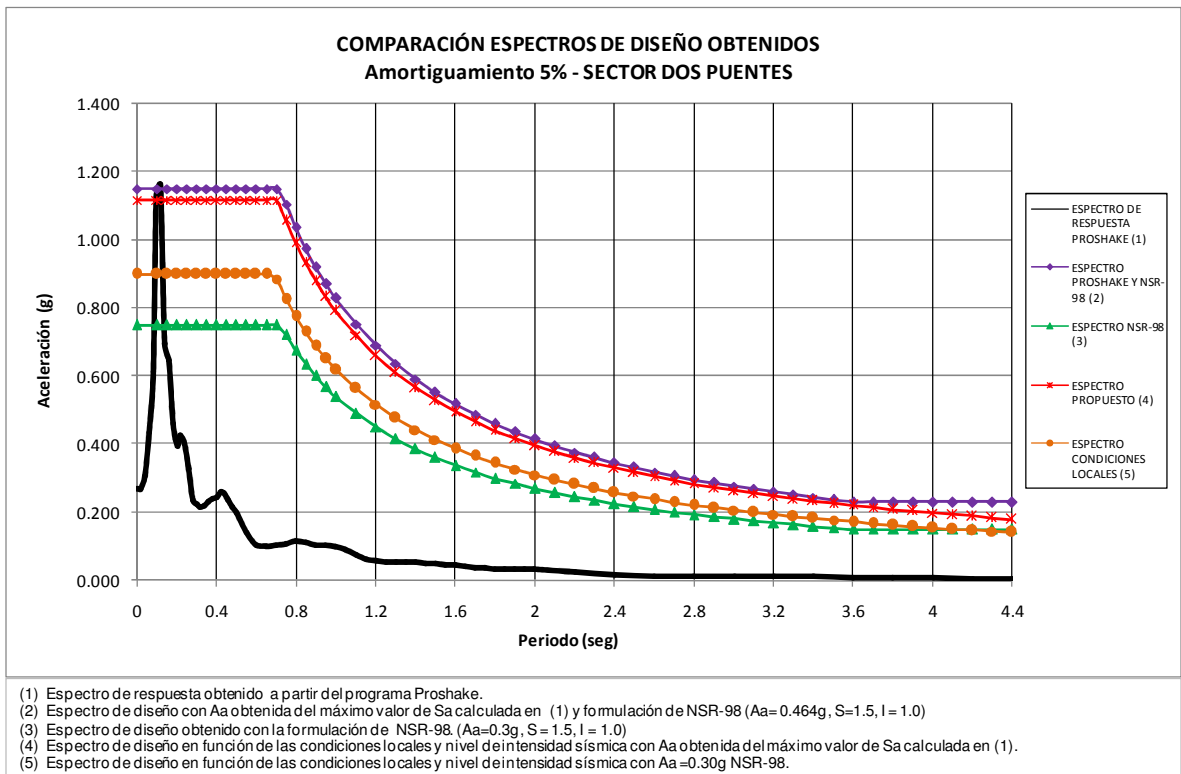


Figura 8.36. Comparación espectros de diseño obtenidos. Sector Dos Puentes.

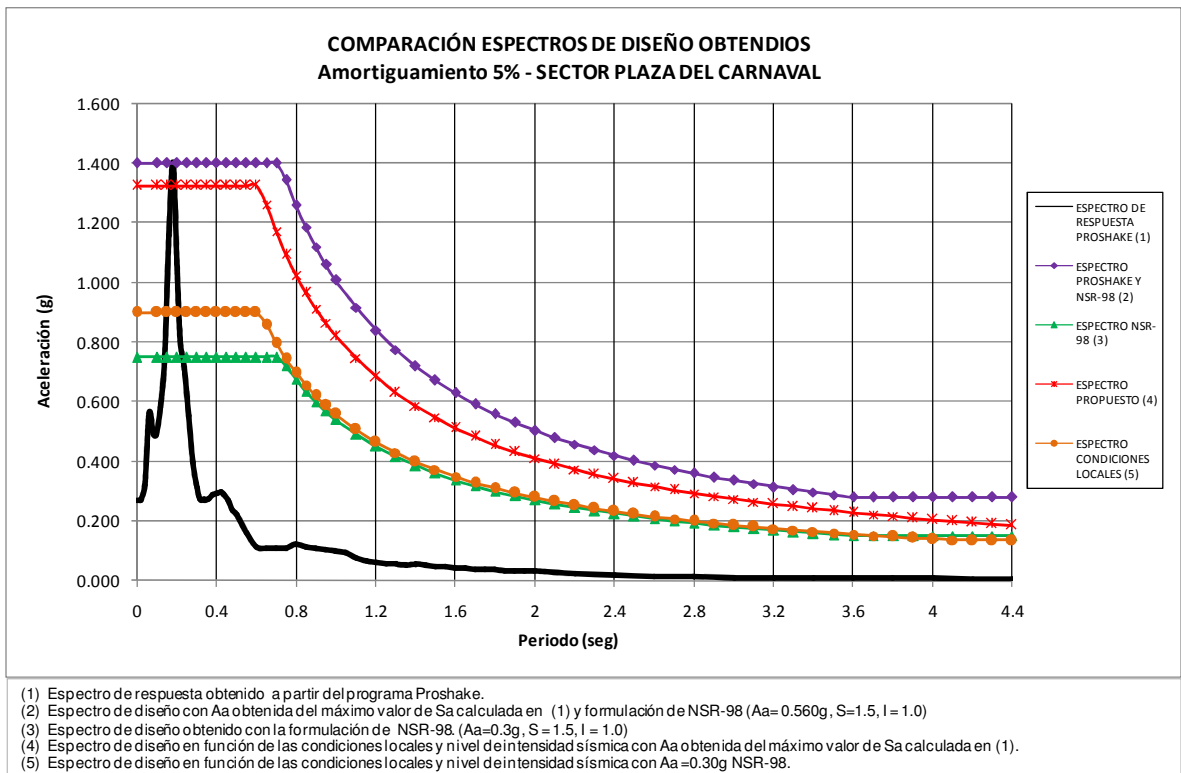


Figura 8.37. Comparación espectros de diseño obtenidos. Sector Plaza del Carnaval.

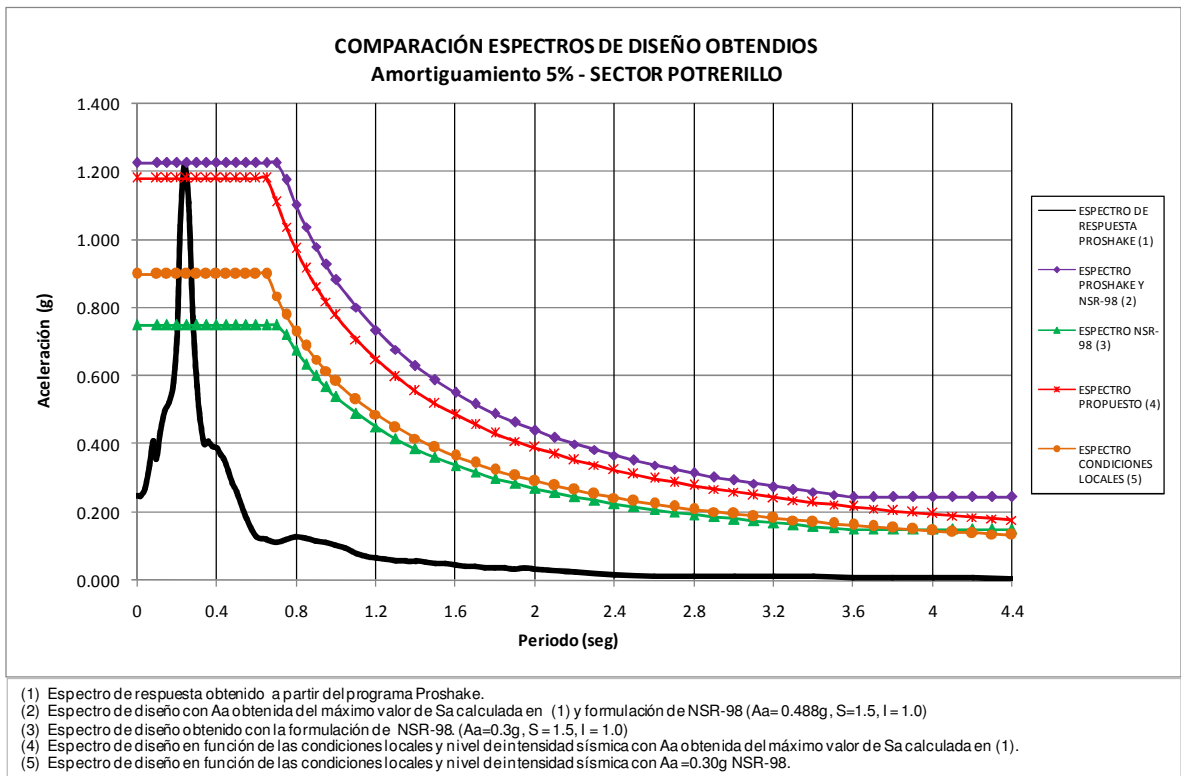


Figura 8.38. Comparación espectros de diseño obtenidos. Sector Potrerillo.

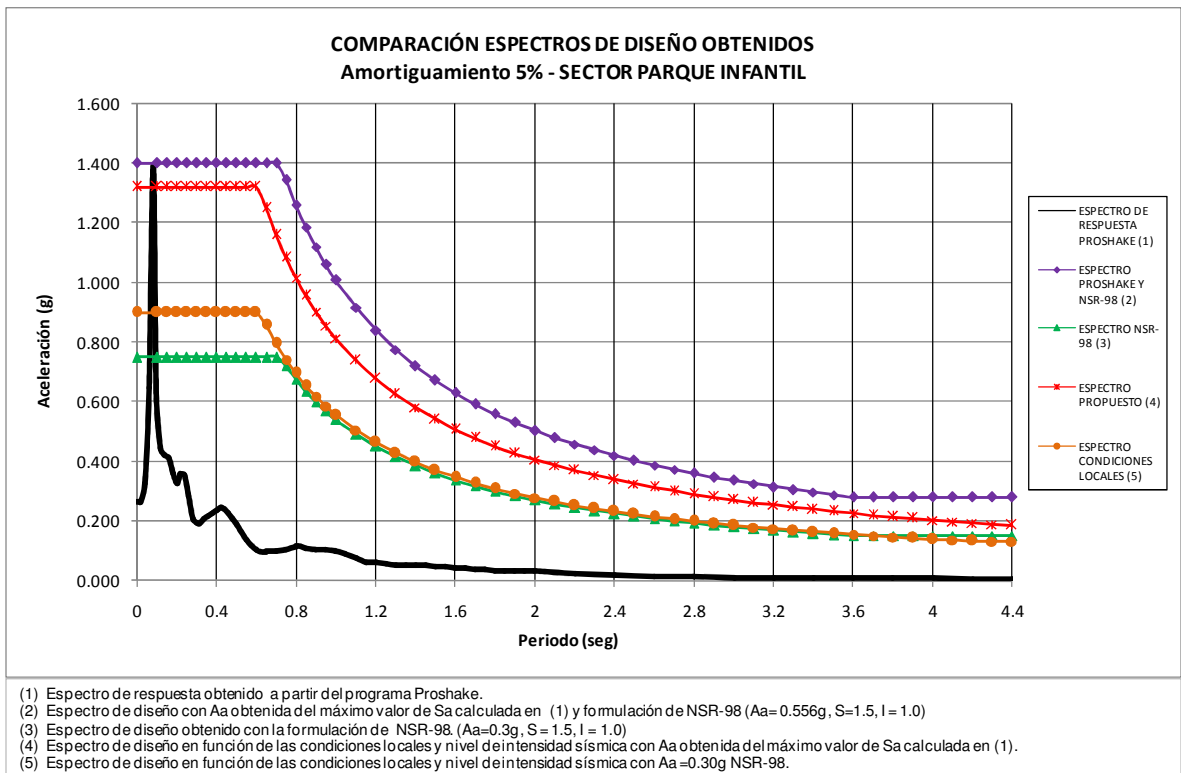


Figura 8.39. Comparación espectros de diseño obtenidos. Sector Parque Infantil.

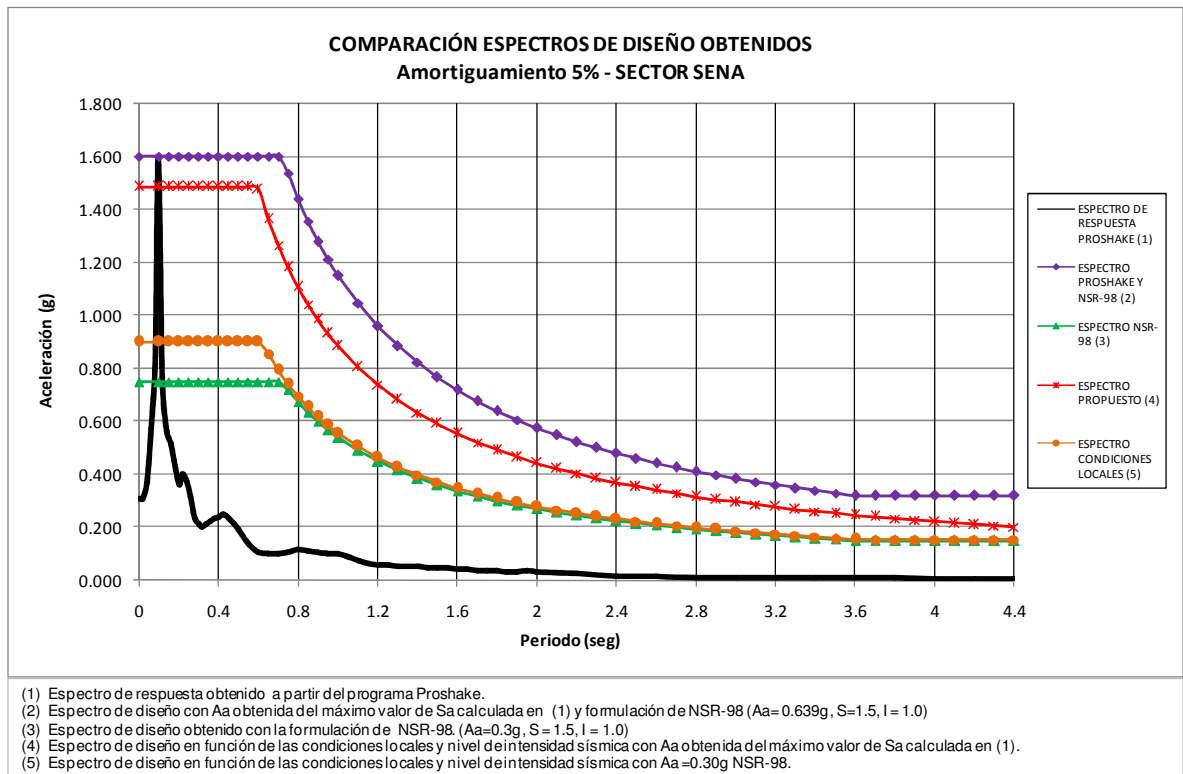


Figura 8.40. Comparación espectros de diseño obtenidos. Sector Sena.

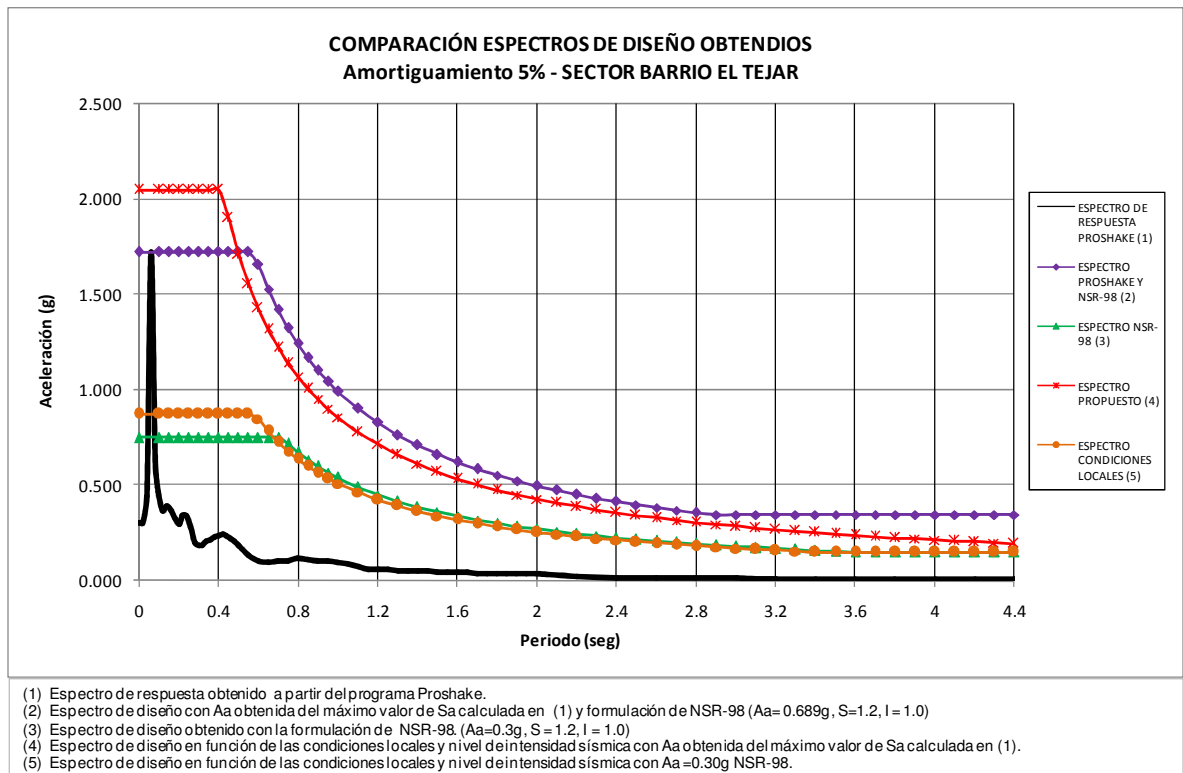


Figura 8.41. Comparación espectros de diseño obtenidos. Sector Barrio El Tejar.

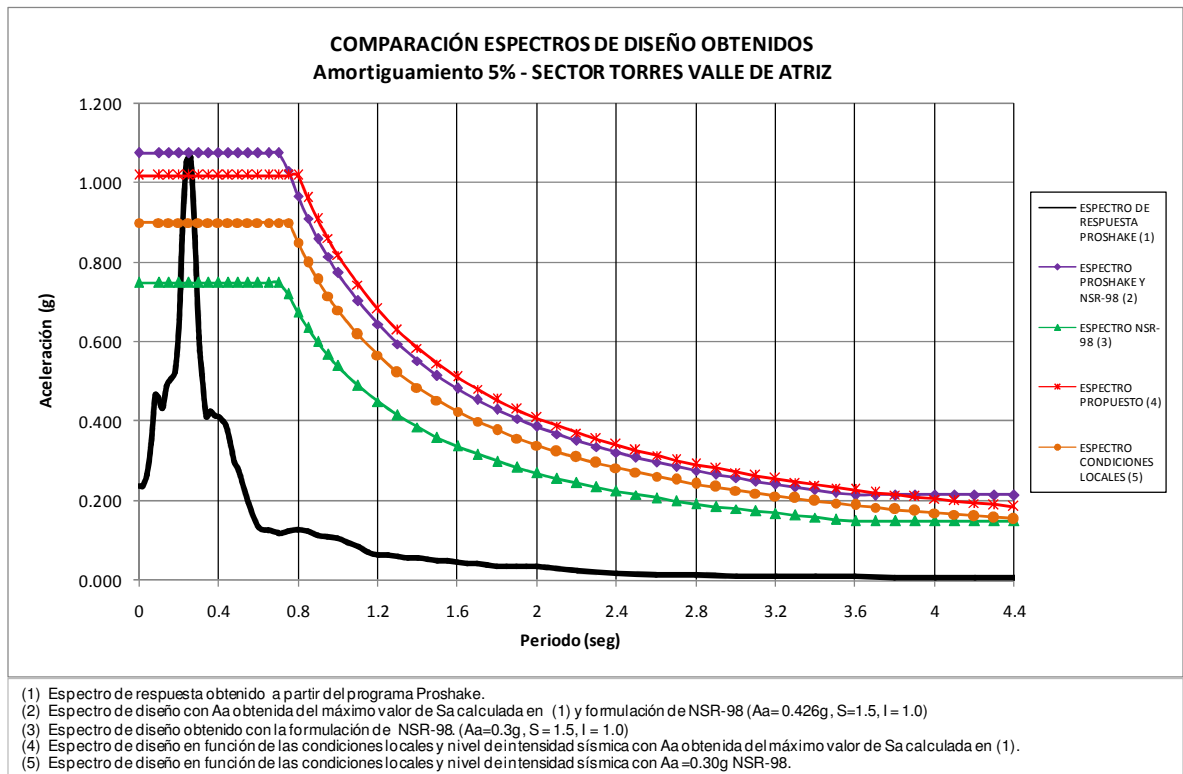


Figura 8.42. Comparación espectros de diseño obtenidos. Sector Torres Valle de Atriz.

En general se observa para los perfiles estratigráficos establecidos para cada uno de los sectores en análisis y con las propiedades dinámicas anotadas en capítulos anteriores que el espectro elástico propuesto por la Norma de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98 está sub diseñado, ya que los espectros calculados a partir de los resultados obtenidos con el software Proshake y los espectros de diseño en función de las condiciones locales para distintos niveles de intensidad y con el nivel de intensidad recomendado por la NSR-98 para San Juan de Pasto, están en todos los casos por encima del mismo.

9. CONCLUSIONES

1. El método de microtrepidaciones propuesto por Nakamura aporta valiosa información en poco tiempo y bajos costos. Sin embargo, para estudios de microzonificación sísmica es importante contar con información complementaria obtenida a partir de otras metodologías.
2. Debido a la utilización del método de microtrepidaciones propuesto por Nakamura en numerosos proyectos de investigación alrededor del mundo, se han diseñado programas que permiten un rápido y confiable análisis de los registros basados en dicho método. Dentro de la revisión bibliográfica desarrollada para este trabajo de investigación se encontraron diversos programas diseñados para tal fin, siendo el programa J-SESAME, aquel que permite un análisis más detallado del tratamiento básico de señales y aplicación de la relación espectral de manera confiable.
- 3.

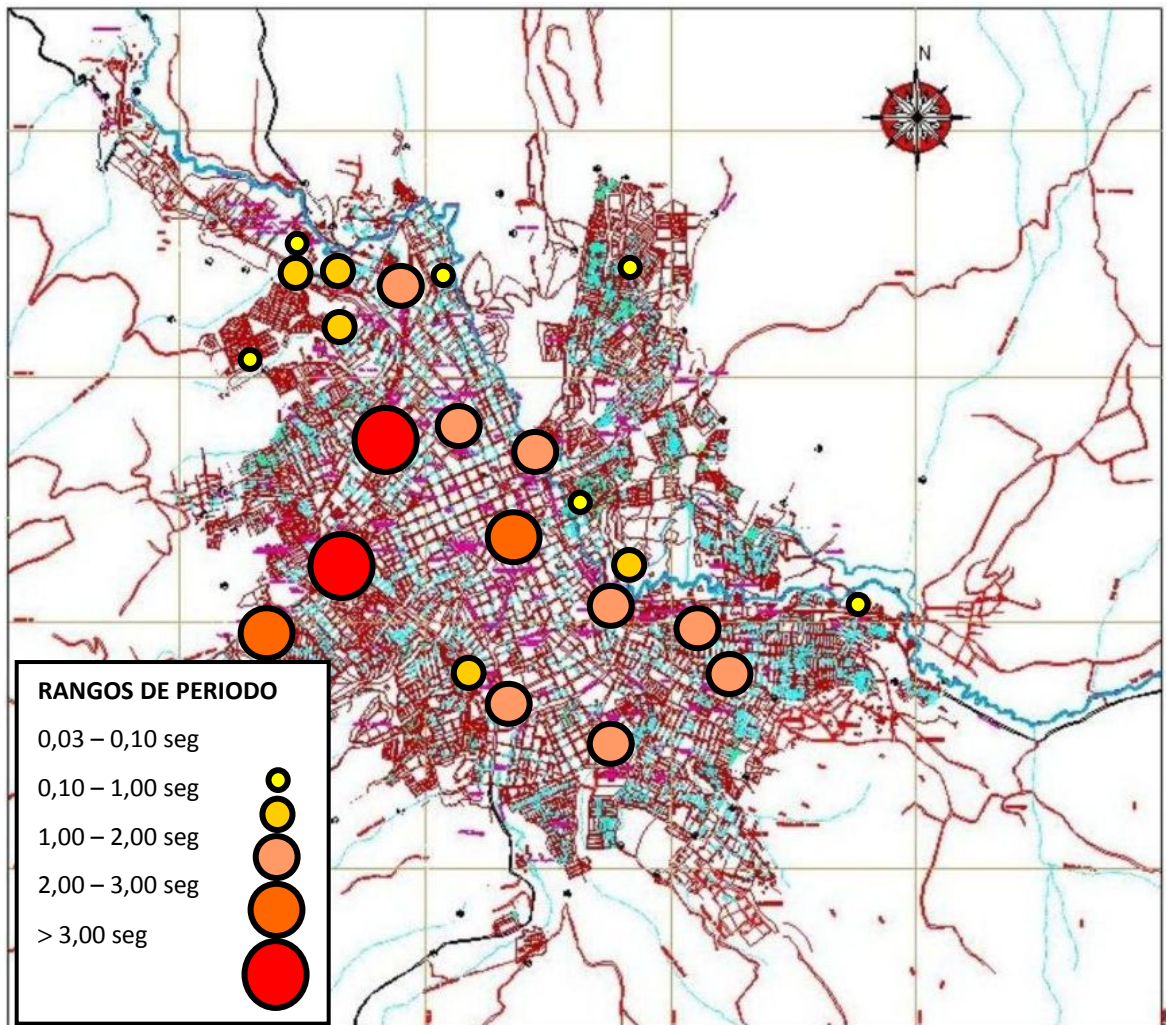


Figura 9.1. Distribución de los periodos resultantes a partir de análisis de microtrepidaciones.

De acuerdo a las propiedades dinámicas deducidas de los suelos presentes en cada uno de los perfiles de los sectores en análisis tal y como se muestran en el anexo 1, los sectores Universidad de Nariño - Facultad de Ingeniería, Morasurco, Nueva Aranda, Sector lote colegio nuevo Javeriano, SENA y Aquine presentan un periodo fundamental entre 0,03 a 0,10 segundos.

Con base en las frecuencias de vibración obtenidas en estos sectores a partir del análisis de los registros mediante el método de microtrepidaciones propuesto por Nakamura y con referencia en la NSR-98 (ecuación A.4-2), las edificaciones de un piso, presentan un periodo de vibración similar al periodo fundamental de vibración de los suelos, haciendo que estas entren en resonancia.

De igual forma los sectores Pandiaco, Colegio Bethlemitas, Empopasto Centenario, Universidad de Nariño – FACARTES, y Colegio Libertad presentan un periodo fundamental entre 0,10 a 1,00 segundos. Para los sectores como Pandiaco, UDENAR – FACARTES y Colegio Libertad, las edificaciones de 3 a 4 pisos presentan un periodo de vibración similar al de los suelos, mientras que para los demás sectores dentro de este rango de periodos de vibración las edificaciones de 4 a 9 pisos, presentan periodos de vibración similar al periodo de vibración de los suelos.

Los sectores Hospital Departamental, Estadio Libertad, La Paz, Parque Infantil, Dos Puentes, Potrerillo, El Tejar y Torres Valle de Atriz presentan un periodo fundamental de vibración de los suelos entre 1,0 y 2,0 segundos. De acuerdo a estos resultados y con base en la ecuación A.4-2, NSR-98, las edificaciones de 17 a 33 pisos, presentan un periodo de vibración similar al periodo fundamental de vibración de los suelos.

Para los sectores Plaza del Carnaval y Empopasto San Felipe el periodo de vibración de los suelos está dentro del rango de 2,0 a 3,0 segundos, siendo las edificaciones con más de 17 pisos aquellas que presentan periodos de vibración similar al periodo de vibración de los suelos.

Finalmente los sectores Colegio INEM y Colegio San Francisco Javier Primaria, presentan periodos de vibración mayores a 3,00 segundos. Las edificaciones de 15 pisos, pueden presentar periodos de vibración similares al del suelo, haciendo que estas entren en resonancia.

4. De acuerdo a los 5 rangos de periodos de vibración fundamental establecidos para el análisis de resultados en la figura 9.1, el primer rango (0,03 – 0,10) seg. representa el 26,10% del total; el segundo rango (0,10 – 1,00) seg. representa el 21,70%; el tercer rango (1,00 – 2,00) seg. de periodos fundamentales de vibración de los suelos representa el 34,80% del total, siendo éste el que más se repite dentro de los sectores en estudio, mientras que el cuarto y quinto rango (2,00 – 3,00) seg. y > 3,00 seg. representan el 8,7% cada uno del total.
5. La determinación de las propiedades estáticas y dinámicas de los suelos es una labor importante en todo lo que tiene que ver con diseño y construcción de obras. Su importancia aumenta dependiendo de la obra a construir y de la zona donde este ubicada.

6. De acuerdo a las columnas de suelo obtenidas en el capítulo 4 para cada uno de los sectores en estudio, los materiales predominantes son arenas limosas y limos de alta y baja plasticidad, que de acuerdo a la clasificación unificada de los suelos U.S.C, se tratan de SM, ML y MH respectivamente.
7. Con base en los perfiles estratigráficos obtenidos de los resúmenes de los estudios geotécnicos seleccionados para el presente trabajo, no es posible asociar un periodo de vibración fundamental a un sector en específico, por lo que es apropiado densificar los registros de microtrepidaciones con base en una zonificación geotécnica preliminar.
8. De acuerdo con los valores de amplificación respecto a la menor amplitud obtenida que fue en el sector del Colegio Libertad, sectores como Colegio San Francisco Javier Primaria, Plaza del Carnaval y Estadio Libertad son aquellos que amplifican hasta 8 veces más las señales de microtrepidaciones, siendo estos los sectores mas susceptibles a daños causados por sismos que se puedan presentar en la región.
- 9.

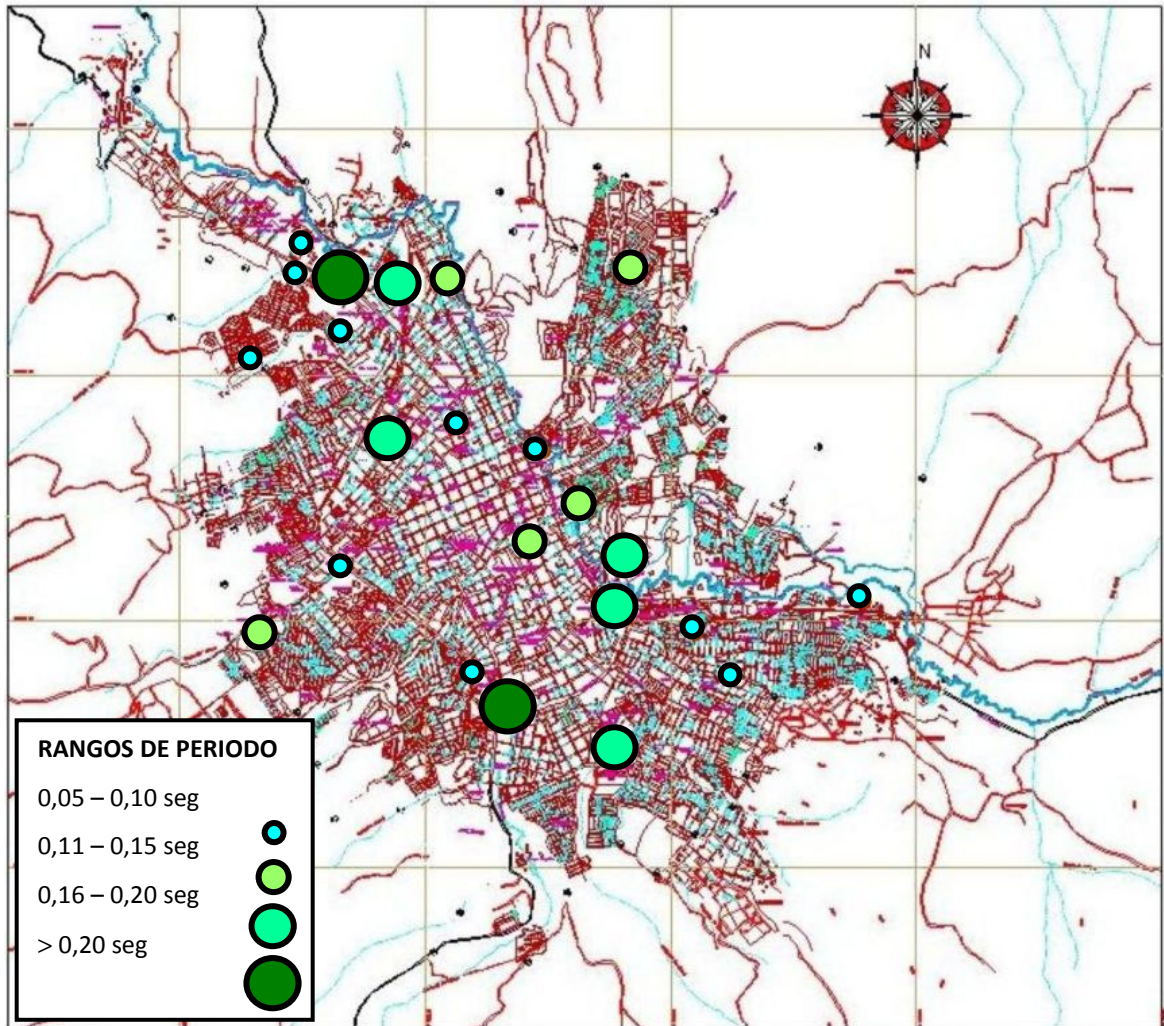


Figura 9.2. Distribución de los periodos resultantes a partir del programa ProShake – Pulsos de Ricker.

Con los periodos predominantes del suelo obtenidos mediante el programa ProShake con pulsos de Ricker (Figura 9.2), para cada uno de los sectores en análisis con las propiedades dinámicas y columnas estratigráficas como se muestra en el capítulo 4, es posible definir cuatro rangos de periodos (Ver figura 9.2); Desde (0,05 – 0,10) seg. para los sectores Universidad de Nariño - Facultad de Ingeniería, lote Nuevo Javeriano, El Tejar, Colegio Libertad, Colegio Bethlemitas, La Paz, Parque Infantil, Colegio INEM, SENA, sector Dos Puentes, y Universidad de Nariño Facultad de Artes; (0,11 – 0,15) seg. para los sectores Morasurco, Aquine, Aranda, Plaza del Carnaval y Empopasto Mijitayo; (0,16 – 0,20) seg. para los sectores de Hospital Departamental, Colegio San Francisco Javier primaria, Potrerillo, Empopasto Centenario y Torres Valle de Atriz; Mayores a 0,20 segundos en sectores como Pandiaco y Estadio Libertad.

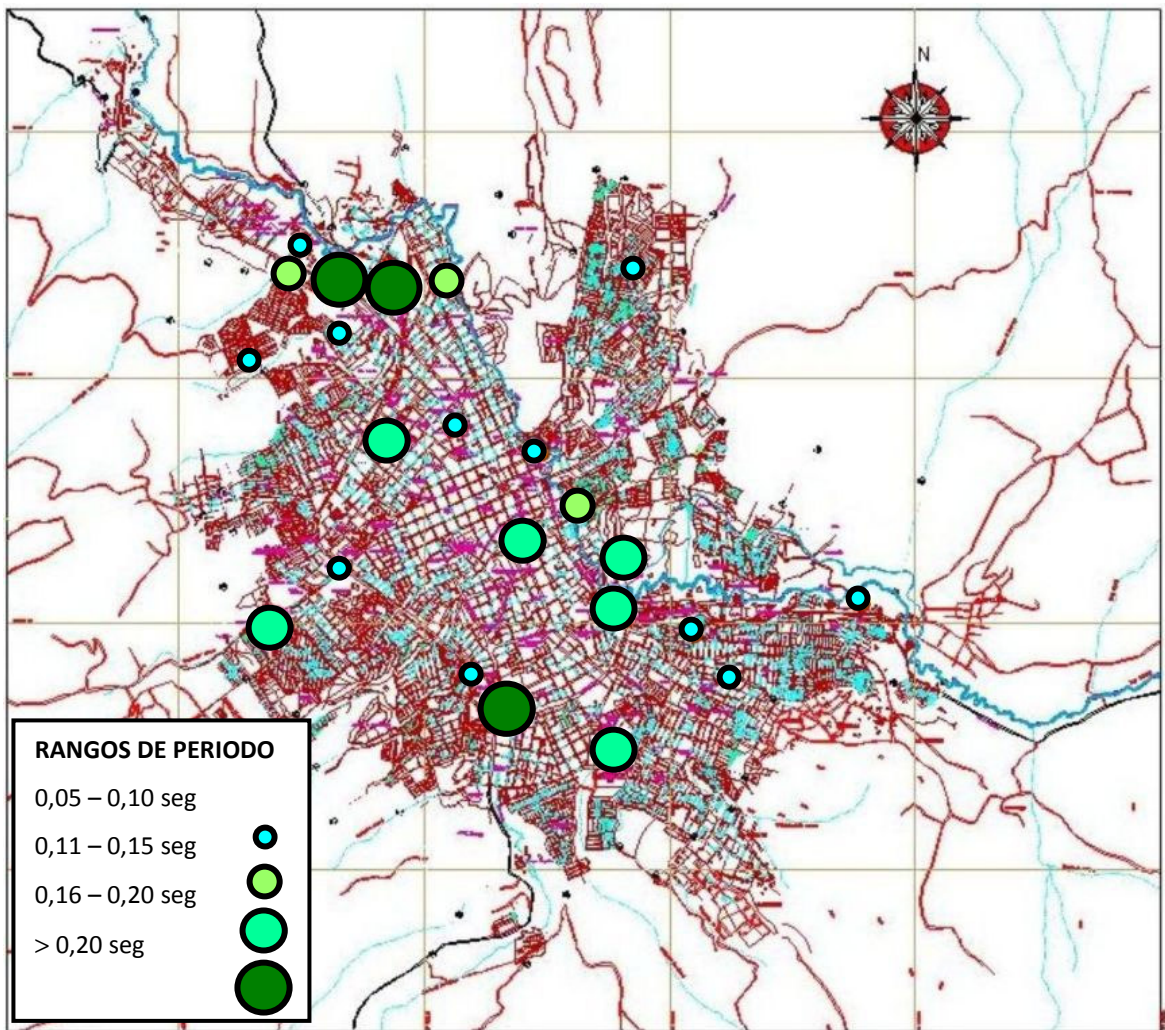


Figura 9.3. Distribución de los periodos resultantes a partir del programa ProShake – Sismos diferentes valores de magnitud local.

Los resultados obtenidos con sismos de diferentes magnitudes, presentan periodos predominantes similares al análisis realizado con pulsos de Ricker, mostrando cambios en sectores como Aranda, cuyo periodo entra en rango de (0,05 – 0,10) seg.;

Universidad de Nariño – Facultad de Artes en (0,11 – 0,15) seg.; Plaza del Carnaval y Empopasto Mijitayo en (0,16 – 0,20) seg. y Torres Valle de Atriz que entra al rango de periodos predominantes mayores a 0,20 segundos.

- Mapa de Aceleraciones Pico Efectivas (Aa), calculada a partir del máximo valor de Sa del espectro de Respuesta obtenido del programa ProShake y la formulación de NSR-98.

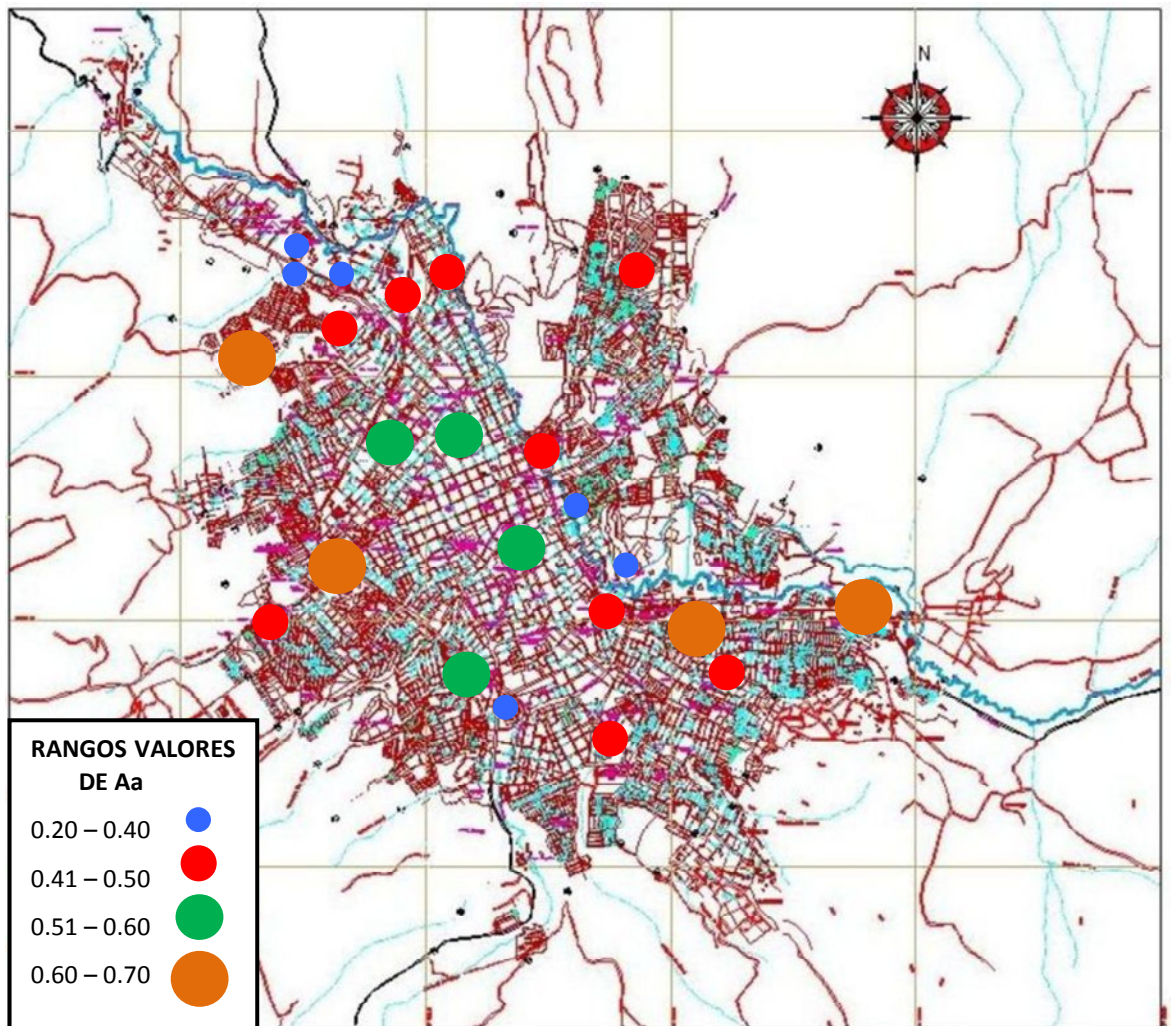


Figura 9.4. Distribución de las Aceleraciones Pico Efectivas en los 23 sectores en estudio.

- De acuerdo con los resultados obtenidos mediante el programa ProShake con sismos de diferentes magnitudes y con base en la ecuación A.4-2 de la NSR-98 en los sectores Colegio Bethlemitas, Colegio Libertad, Universidad de Nariño – Facultad de Ingeniería, Colegio INEM, La Paz, Lote Nuevo Javeriano, Parque Infantil, SENA y El Tejar las edificaciones de un piso presentan un periodo fundamental de vibración similar al periodo de vibración predominante de los suelos haciendo que estas entren en resonancia. Así mismo los sectores como Aquine, Aranda, Universidad de Nariño – Facultad de Artes, Morasurco y Dos Puentes las estructuras que presentan un periodo

de vibración similar al periodo predominante de los suelos, son aquellas de 1 y 2 pisos. Los periodos predominantes de los suelos en sectores como el Hospital Departamental y Plaza del Carnaval presentan un periodo de vibración similar al de edificaciones de 2 y 3 pisos.

Los sectores Empopasto Centenario, Empopasto Mijitayo y Colegio San Francisco Javier Primaria presentan periodos de vibración fundamental de los suelos con aquellas estructuras de 2 pisos. Para los sectores Potrerillo y Torres Valle de Atriz las edificaciones de 2 a 4 pisos tienen periodos de vibración que pueden entrar en resonancia con el periodo predominante de los suelos. Finalmente en sectores como Pandiaco y Estadio Libertad las edificaciones con un número de pisos mayor a 3 presentan periodos de vibración similares al periodo fundamental de vibración de los suelos haciendo que estos entren en resonancia.

12. De acuerdo a los resultados obtenidos con el procesamiento de microtrepidaciones y con el programa ProShake, la vulnerabilidad de las estructuras existentes en la ciudad de San Juan de Pasto es alta, especialmente para aquellas de uno y dos pisos.
13. Los periodos de resonancia calculados con el método de las velocidades de corte (Zeevaert), los calculados con el programa ProShake y los calculados con la fórmula H.5-9 de la Normas Colombianas de diseño y construcción Sismo Resistente, para cada uno de los sectores en análisis, son similares, a pesar de las diferencias en la fundamentación teórica de cada uno de los métodos. (Ver resultados en entorno gráfico de Consulta).
14. Los resultados de periodos fundamentales para cada uno de los sectores obtenidos a partir del análisis de los registros de microtrepidaciones mediante el método de Nakamura y el programa ProShake, presentan notables diferencias causadas posiblemente a factores externos como la baja densificación de registros, y el desconocimiento de la profundidad del basamento rocoso.
15. Con base en la experiencia del uso de los 2 equipos en la medición de microtrepidaciones en la campaña realizada en San Juan de Pasto, se recomienda el uso del acelerógrafo Kinematics modelo ETNA, por las facilidades de uso, ya que el sensor y la unidad de digitalización están ensambladas, permitiendo la digitalización de los datos sin la necesidad de instalar una unidad externa, sin embargo se debe tener en cuenta que los acelerógrafos no son lo suficientemente sensibles para las frecuencias bajas, por lo cual se debe chequear que el ancho de banda del mismo supere el rango de frecuencias de interés del estudio, en cambio con el sismógrafo de banda ancha Guralp con unidad de digitalización Nanometrics, el sensor se instala en campo y luego mediante conexión por cable se instala la unidad de digitalización, y a pesar de su alta sensibilidad requiere un tiempo de estabilización más largo, por lo que se recomienda probar la estabilidad del mismo antes de usarlo. En general los dos equipos pueden ser empleados para la medición de microtrepidaciones siempre y cuando se tengan en cuenta las recomendaciones antes mencionadas.
16. Los espectros de diseño generados a partir de las metodologías explicadas en el capítulo 8, muestran que el Espectro Elástico de diseño con un amortiguamiento del 5% respecto al crítico recomendado por la Norma de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98, está subdiseñado para todos los sectores en análisis.

En general los resultados de los espectros muestran que los valores de la aceleración pico efectiva (A_a) y la máxima aceleración (S_a), aumentan en un 30% en promedio respecto a lo recomendado por la NSR-98.

17. Es importante conocer metodologías para establecer espectros de diseño en función de las condiciones locales para distintos niveles de intensidad, ya que estos involucran parámetros dinámicos de los suelos tales como la velocidad de ondas de corte (V_s), y estas se pueden determinar para cualquier unidad geotécnica a partir de correlaciones en función del valor de penetración estándar como se definió en el capítulo 4, logrando así que estos espectros sean adecuados para un correcto diseño sísmo resistente, mostrando lo limitada que resulta la NSR-98, para definir los espectros de diseño en unidades geotécnicas en particular.

10. RECOMENDACIONES

1. Impulsar el uso de las microtrepidaciones, para estudios de caracterización dinámica de suelos y estructuras, ya que esta técnica ha sido difundida en todo el mundo, por su rápida ejecución y bajos costos.
2. Comparar los resultados de periodos obtenidos con el uso exclusivo de microtrepidaciones, con los calculados con métodos numéricos y registros de movimientos fuertes, ya que las microtrepidaciones no garantizan que el periodo fundamental de los suelos obtenido, sea el adecuado.
3. Explorar métodos de arreglos instrumentales, que permiten el reconocimiento de la estructura del subsuelo; porque la aplicación del método de Nakamura H/V mediante solo un punto de observación, permite únicamente la obtención del periodo natural del sitio y en algunos ocasiones la amplificación asociada. La ventaja de estos arreglos es que admiten la utilización de métodos de análisis como el Spatial Autocorrelation Method SPAC (Aki, 1957), el método F-K (Capón, 1969), o ReMI (Louis, 2001) que proporcionan la velocidad de fase de ondas Rayleigh, a partir de la cual es posible estimar la estructura de velocidades y el efecto de las condiciones del subsuelo en las características del movimiento (Horike, 1985, Tokimatsu, 1997, Yamamoto, 1998, Liu et al., 2000, Flores-Estrella y Aguirre-gonzales, 2001, Rodriguez et al., 2003, Flores-Estrella, 2004). Originalmente, Aki (1957), propuso para SPAC un arreglo con geometría circular, pero sugirió también el uso de sólo dos estaciones, sugerencia seguida recientemente por Chavez-García (2005) quienes han mostrado que es posible usar SPAC sin la restricción geométrica del arreglo. La comparación de los resultados de SPAC con sólo dos estaciones y ReMi, en algunos sitios del estado de Colima, México, permitieron identificar claramente que la validez de los resultados de ambas técnicas la restringe el rango de distancias entre las estaciones y la estructura de la velocidad bajo el sitio. Una aplicación de la utilización de arreglos de microtembres para la determinación de la estructura superficial del suelo en Tsukuba (Japón), se realizó mediante un arreglo triangular de 10 sensores, el lado mayor del triangulo con 50 metros; mediante el registro de microtembres de corto periodo se estimaron las coherencias, las curvas de dispersión y mediante inversión se determinó la estructura del subsuelo. Es importante destacar que se pueden realizar arreglos de mayores dimensiones utilizando microtembres para estimar la estructura profunda del subsuelo, alcanzando profundidades de hasta 1000 metros (Hayashi 2005; Alfaro 2005b).
4. Instalar en roca, una red de acelerógrafos permanente que permita obtener parámetros adecuados, para futuros estudios orientados al análisis de respuesta dinámica de los suelos y microzonificación sísmica en la ciudad de San Juan de Pasto.
5. Usar un sensor de velocidad o aceleración que registre las tres componentes (N-S, E-W, U-D), además dicho sensor debe tener un periodo natural de vibración que junto con la ganancia del sistema permitan registrar ondas de amplitudes del orden de 10^{-6} m/s, con frecuencias de vibraciones entre 0.1 y 12 Hz, ya que estas son las frecuencias de interés para ingeniería. Para posteriores estudios en la ciudad de San Juan de Pasto que involucren el registro de microtrepidaciones.

6. Realizar estudios complementarios que permitan determinar la posición del basamento rocoso y parámetros dinámicos de los suelos en los sectores a analizar: para ser usadas en la determinación de los efectos de sitio mediante análisis unidimensional con el programa PROSHAKE 2002.
7. Complementar la metodología explicada en el desarrollo del proyecto, mediante ensayos de laboratorio y de campo, para dar continuidad al presente trabajo y generar nuevas líneas de investigación en el Centro de Investigación de Ingeniería Sismológica y Geotécnica de la Universidad de Nariño, así:
 - a. Realizar una recopilación de los sismos ocurridos cerca o sobre la ciudad de San Juan de Pasto, que permitan realizar el cálculo del Espectro de respuesta más probable correspondiente a la ciudad, y los sismos a partir de los cuales se calculó dicho espectro; ya que estos pueden ser usados como movimientos de entrada, siendo sismos reales ocurridos en la ciudad o región, en la aplicación de métodos numéricos para el cálculo de efectos sísmicos como en el programa ProSHAKE 2002.
 - b. Determinar del evento sísmico más probable para la ciudad de San Juan de Pasto con respecto a parámetros como magnitud local, intensidad, entre otras.
 - c. Determinar de las propiedades dinámicas de los suelos mediante procedimientos de laboratorio y métodos de campo tales como:

PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO

- Ensayos de pulsos ultrasónicos
- Ensayos de columna resonante
- Ensayo de péndulo de torsión
- Ensayo triaxial cíclico
- Ensayo de corte simple cíclico
- Ensayo de torsión cíclica
- Ensayo en mesa vibradora

MÉTODOS DE CAMPO

- Ensayos de ondas de superficie
- Ensayos de refracción sísmica
- Ensayos de resonancia vertical
- Ensayos de resonancia horizontal
- Ensayos de *up-hole* y *down-hole*
- Ensayos *cross-hole*

Adicionalmente determinar correlaciones con el módulo G y velocidades de ondas de corte (V_s) a partir de valores de penetración estándar para suelos presentes en la región.

Realizar excavaciones profundas (*hasta encontrar roca*) en las diferentes unidades geotécnicas presentes en la ciudad de San Juan de Pasto, para determinar las funciones de transferencia mediante mediciones de registros en roca y superficie; Especialmente en suelos blandos ya que estos amplificarían los efectos causados por un eventual sismo.

8. Usar el espectro de diseño propuesto en el presente proyecto en los casos de diseños Estructurales, ya que se observa en general para los perfiles estratigráficos establecidos para cada uno de los sectores en análisis y con las propiedades dinámicas anotadas en capítulos anteriores, el espectro elástico propuesto por la Norma de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98 está sub diseñado, puesto que los espectros calculados a partir de los resultados obtenidos con el software Proshake y los espectros de diseño en función de las condiciones locales para distintos niveles de intensidad y con el nivel de intensidad recomendado por la NSR-98 para San Juan de Pasto, están en todos los casos por encima del mismo.

11. BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA CAPITULO 1

- ALFARO, A., M. Navarro, J. Sánchez y L..G. Pujades. Microzonificación sísmica de Barcelona utilizando el método de Nakamura. Ventajas y Limitaciones. Proc. Primer Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Murcia. España. (1997a). 1:273-278.
- ALFARO, A., J. J. Egozcue y A. Ugalde (1997b). Determinación de características dinámicas del suelo a partir de microtemblores. Proc. Primer Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Murcia. España. 2:435-441.
- ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA / AIS. Normas colombianas de diseño y construcción sismorresistente, NSR-98. Ley 400 de 1997. Decreto Ley 33 de 1998. AIS: Bogotá, 1998. CD-ROM, 11 Secciones.
- BERMÚDEZ, María Luisa., FRANCO, Luís Enrique., MARTINEZ, Samuel., OJEDA, Aníbal. Uso de las microtrepidaciones para la evaluación de la respuesta dinámica de los suelos. En: SIMPOSIO COLOMBIANO DE SISMOLOGÍA "Avances de la sismología en los últimos veinte años". (1º: 2002: Santa Fe de Bogotá). Memorias del Primer simposio Colombiano de Sismología. Bogotá, Universidad Nacional, Ingeominas, 2002. 2 p.
- BERMÚDEZ, María Luisa., PACHON, Samuel., MARTÍNEZ, Samuel., OJEDA, Aníbal. Estimación del Ts en el área Metropolitana de Bucaramanga. En: SIMPOSIO COLOMBIANO DE SISMOLOGÍA "Avances de la sismología en los últimos veinte años". (1º: 2002: Santa Fe de Bogotá). Memorias del Primer simposio Colombiano de Sismología. Bogotá, Universidad Nacional, Ingeominas, 2002. 4 p.
- CABAÑAS, Luís., BENITO, B., CABAÑAS, C., LÓPEZ, M., GÓMEZ, P., JIMÉNEZ, M.E., ÁLVAREZ, S. Física de la tierra: Banco de datos de movimiento fuerte del suelo MFS. Aplicaciones. 1999. 114 p. ISSN: 0214-4557
- CALPA, C. y PANTOJA, J., ALFARO, A., HISSENHOVEN, René., INSTITUTO GEOGRÁFICO UNIVERSIDAD JAVERIANA. Aportes a la Microzonificación sísmica de Pasto. Bogotá, (2001). Trabajo de grado. Pontificia Universidad Javeriana. Instituto Geofísico.
- COLINDRES, Rafael. Dinámica de suelos y estructuras: Utilización del periodo de resonancia del suelo y estructuras. 2DA Edición. Santa Fe de Bogotá: Limusa, 2001. 240, 267 p.
- Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER, Colombia - RED DE ESTUDIOS SOCIALES EN PREVENCIÓN DE DESASTRES EN AMÉRICA LATINA, Marzo 1998 - Noviembre 1998, Coordinador del Proyecto, Diseño e implementación del Proyecto de Capacitación en Gestión Local del Riesgo en el Departamento de Risaralda.
- COTTON, F., P.-Y. BARD, C. BERGE & D. HATZFELD. ¿Que es lo que hace vibrar a Grenoble?. En: Revista Mundo Científico, Paris. Vol. 203. (1999); 21-23 p.
- DRAKE, D. Natural and statistical view, or picture of Cincinnati and the Miami Country, Illustrated by Maps. Looker & Wallace: Cincinnati. (1815) Citado en: FIELD, H. & GRUPO DE TRABAJO DE LA FASE III del SCEC. Accounting for site effects in probabilistic seismic hazard analyses of southern California: overview of

- the SCED Phase III report. En : Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 90, No. 6B. (2001); S1-31
- DOBRY, R., R. D. BORCHERDT, C. B. CROUSE, I. M. IDRIS, W. B JOYNER, G. R. MARTIN, M. S. POWER, E. E. RINE & R. B. SEED. New site coefficients and site classification system used in recent buildings seismic code provisions. En : Earthquake Spectra Vol. 16. (2000); 41 – 68 p.
 - FIELD, H. & GRUPO DE TRABAJO DE LA FASE III del SCEC. Accounting for site effects in probabilistic seismic hazard analyses of southern california: overview of the SCED Phase III report. En : Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 90, No. 6B. (2001); S1-31.
 - LADOUCKETTE, J. C. Note sur le tremblement de terre piémontais du avril 1808 (historia, topographie, antiquités, usages, dialectes des Hautes-Alpes). Paris, 1848. Citado en: COTTON, F., P.-Y. BARD, C. BERGE & D. Hatzfeld. ¿Que es lo que hace vibrar a Grenoble?. En : Revista Mundo Científico, Paris. Vol. 203. (1999); 21-23 p.
 - NAKAMURA, Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. RTRI, Vol.30. No. 1. 1989. 25-33 p.
 - ROSALES CLIMENT, Cristina. Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia. Cali, 2001, 275 p. Trabajo de grado (Ingeniera Civil). Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática.
 - RODRIGUEZ – MAREK, A., J. BRAY & N. ABRAHAMSON. A Geotechnical seismic site response evaluation procedure. Paper 1590 En: Proc. of 12TH WORLD CONFERENCE IN EARTHQUAKE ENGINEERING. Nueva Zelanda. (2000); 8 p.
 - SARRIA, Alberto. Métodos geofísicos con aplicaciones a la Ingeniería Civil. Bogotá: Ediciones Uniandes, 1996. 371 p.
 - SARRIA, Alberto. Sismos y maremotos “Un antiguo reto para la humanidad (parte I). En: La revista de la técnica y de la construcción Noticreto, Bogotá (15, jul, 2005); 54 – 62 p.
 - SAUTER, F. Fundamentos de Ingeniería sísmica. Editorial Tecnológica de Costa Rica: San José, Costa rica, 1989. 271 p.
 - SEED, H. B., R. MURAJA, J. LYSMER, I. M. IDRIS. Relationships between maximum acceleration, maximum velocity, distance from source and local site conditions for moderately strong earthquakes. En : Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 66. (1976); 1323 – 1342 p.
 - TIEDEMANN, H. Earthquake and volcanic eruptions: A handbook on risk assessment. Swiss Reinsurance Company: Zurich, 1992. 951 p.

BIBLIOGRAFÍA CAPITULO 2

- GÓMEZ M., Diego M. y CORTÉS J., Gloria P. Generalidades sobre el episodio sísmico de marzo de 1995 en el área de influencia del volcán Galeras. Reporte Preliminar. Pasto. Marzo 19 de 1995.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 1996. Atlas de Colombia. CD-ROM
- INGEOMINAS, Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto. Episodio Sísmico de Alta Frecuencia, Marzo de 1995. Reporte Preliminar. Marzo de 1995. Pasto.

- INGEOMINAS. Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia. Comité AIS300- Amenaza Sísmica. INGEOMINAS, Universidad de los Andes, Asociación Colombiana de Ingeniería. Publicación Especial INGEOMINAS. Bogotá, 1998.
- MUÑOZ QUIJANO, Ingrid. Estudio geológico detallado del área urbana y suburbana del municipio de Pasto. Manizales. 1998. 96 p. Tesis (Geóloga). Universidad de Caldas. Facultad de ciencias exactas y naturales.
- MURCIA, Armando., CEPEDA, Hector. Mapa geológico de Colombia. Plancha 429 – Pasto (Departamento de Nariño). Escala 1:100000. INGEOMINAS Bogotá. 1991. 17p.
- RAMÍREZ, Jesús Emilio, S.J. Historia de los Terremotos en Colombia. Instituto Geofísico Agustín Codazzi. 1975.
- RAMÍREZ, Jesús Emilio, S.J. y GOBERNA, José Rafael. Terremotos Colombianos Noviembre 23 y Diciembre 12 de 1979. Instituto Geofísico de los Andes Colombianos. Universidad Javeriana. Serie A: Sismología No. 45. Bogotá, 1980. 95 p.
- RODRIGUEZ G., Ignacio. Estudios geográficos sobre el departamento de Nariño. Imprenta del departamento. Pasto, 1959.
- ROMERO J., Aproximación a la Neotectónica de la región del Volcán Galeras-Colombia. Ingeominas – Instituto de ciencias de la tierra “Jaime Almera” C.S.I.C.
- SARRIA, Alberto. Ingeniería Sísmica. Ediciones Uniandes y Ecoe Ediciones. Santa Fe de Bogotá, 1995. 553 p.
- SILVA PARRA, Betty. Evaluación de la amenaza sísmica en el departamento de Nariño. San Juan de Pasto. 2005. 175 p. Tesis (Físico). Universidad de Nariño. Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas.

BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 3

- AKI, K. and LARNER, K. (1970). Surface motion of a layered medium having an irregular interface due to incident plane SH waves. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 75, N° 5. 933-954 p.
- ALARCON, E. (1989). Respuesta dinámica de suelos. *Física de la Tierra*. Vol. 1. 309-356 p.
- BARBAT, A. H. y CANET, J. M. (1994). Estructuras sometidas a acciones sísmicas. Cálculo por ordenador. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE, Barcelona. 385 p.
- BARD, P-Y. and TUCKER, B. E. (1985). Underground and ridge site effects: a comparison of observation and theory. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 75, pp. 905-922.
- BARD, P.Y. (1985). Les effets de site d'origine structurale: principaux resultants expérimentaux et théoriques. *Genie Parasismique*. Ed. Victor Davidovici. Paris. 223-238 p.
- BARD, P-Y. ET AL. (1995a). Guidelines for seismic microzonation studies. *Association Francaise du Genie Parasismique*. 46 p.
- BENITO, M. B. (1993). Estimación de parámetros sísmicos y aspectos específicos de respuesta característicos del movimiento del suelo en emplazamientos de la Península Ibérica. *Universidad Complutense*. Madrid. 7-51 p.
- BOUCHON, M. (1973). Effect of topography on surface motion. *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 63, N° 3. 615-632 p.
- BRUNE, J. N. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 75. 4997-5009 p.

- CAMPILLO, M. et al. (1988). The Mexico earthquake of September 19, 1985. The incident wavefield in Mexico City during the Great Michoacan earthquake and its interaction with the deep basin, *Earthquake Spectra*, 4. 591-608 p.
- CANTOS, J. Tratado de geofísica aplicada. Madrid. s.p.i. 1973. 520 p.
- CATALÁN, A. (1995). Estudio de las relaciones entre movimientos fuertes y débiles para la predicción de espectros de diseño. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. 109 p.
- CHÁVEZ-GARCÍA, F. H. (1991). Diffraction et amplification des ondes sismiques dans le bassin de México. Tesis Doctoral. Université Joseph Fourier de Grenoble. 331 p.
- CID, J. (1998). Zonificación sísmica de la ciudad de Barcelona basada en métodos de simulación numérica de efectos locales. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, 6-10 p.
- COLOM, F. M. (1995). Generación numérica de acelerogramas compatibles con espectros de respuesta dados. *Ingeniería Civil*. Vol. 100. 77-84 p.
- DELGADO, J. (1997). Zonificación sísmica de la Vega Baja del Río Segura: Análisis de la respuesta del suelo. Universidad de Alicante. Alicante. 101-116 p.
- FIGUERAS, S. (1994). Simulació numérica del moviment del sòl produït per terratrèmols. Aplicació a moviments febles i forts. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona. 9-16 p.
- GELI, L., BARD, P. and JULLIEN, B. (1988). The effect of topography on earthquake ground motion: a review and new results. *Bulletin of the seismological society of America*, 78. 42-63 p.
- GETTYS, W, F. KELLER, M. SKOVE. Física: Clásica y moderna. Editorial McGrawhill: New York, 1991. 1240 p.
- HASKELL, N. A. (1953). The dispersion of surface waves on multilayered media. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 43. 17-34 p.
- HAYS, W. (1989). Aspectos fundamentales de la geología y la sismología para microzonificación sísmica. Física de la tierra. Número 1. Ed. Universidad Complutense de Madrid. 217-250 p.
- CORAL MONCAYO, Hugo. Utilización de métodos experimentales y de simulación numérica para la microzonificación sísmica de áreas urbanizadas en Andorra. Barcelona, 2002. p. 21. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. E. T. S. Ingenieros de Caminos, C. y P. Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica.
- HEUZE, F. E. et al. (1997). A coupled seismic-geotechnical approach to site-specific strong motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Vol. 16. 259-272 p.
- JOYNER, W. B. y BOORE, D. M. (1988). Measurement, characterization and prediction of strong ground motion. *Proceedings of Earthquake Engineering and Soil Dynamics II*, GT Div/ASCE, Park city, Utah. 43-102 p.
- LACHET. (1996). Observation des séismes en milieux urbains: Méthodes simple d'étude des effets de site et de simulation des mouvements forts. Tesis Doctoral. Université Joseph Fourier de Grenoble. 245 p.
- LAY, T. & T. WALLACE. *Modern global seismology*. Int. Geoph. Series. Academic Press: 1995. 521 p.
- NAKAMURA, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*. 30-1. 25-33 p.

- PUJADES, L. (1999). Estimación de efectos locales con movimientos sísmicos y microtemblores. Monografías de Ingeniería Sísmica. 9-55 p.
- ROCA, A., GOULA, X. y SUSAGNA, T. (1999). Física de la tierra: Zonación sísmica a diferentes escalas. Microzonificación. Servicio de publicaciones, Universidad Complutense de Madrid. 203-236 p.
- SARRIA, A. Métodos geofísicos con aplicaciones a la Ingeniería Civil. Ediciones Uniandes: Bogotá, 1996. 371 p.
- SAUTER, F. Fundamentos de ingeniería sísmica. Editorial Tecnológica de Costa Rica: San José, Costa Rica, 1989. 271 p.
- SUHADOLC. (1997). Realistic modeling of seismic wave propagation. Proceedings of the Advanced Study Course on Seismic Risk SERINA. Salónica, Grecia. 125-152 p.
- SECANELL, R. et al. (2002). Unified Probabilistic Seismic Hazard Assessment Around the France-Spain Border. European Seismological Commission (ESC). XXVIII General Assembly, Genoa. 167-168 p.
- YÉPEZ, F. (1996). Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de estructuras aplicando técnicas de simulación. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. 393 p.

BIBLIOGRAFÍA CAPITULO 4

- CID RAMOS, Javier. Estimación de los parámetros dinámicos de los suelos, procedimiento y aplicación a Barcelona. Barcelona, 1996. p. 71. Tesis de Maestría. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona.
- COLINDRES SELVA, Rafael. Dinámica de suelos y estructuras. EDITORIAL LIMUSA, S.A. de C.V. México, 1993. Unidad 4, p. 86 a 97.
- CORAL MONCAYO, Hugo. Utilización de métodos experimentales y de simulación numérica para la microzonificación sísmica de áreas urbanizadas en Andorra. Barcelona, 2002. p. 58,59. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. E. T. S. Ingenieros de Caminos, C. y P. Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica.

BIBLIOGRAFIA CAPITULO 5

- ABEKI, N. K. SEO, M. IWARE, T. ENOMOTO, D. WATANABE, M. SCHIMITZ, R. HERBERT, A. SÁNCHEZ. Microtremor observation in Caracas City, Venezuela. En: The effects of surface geology in seismic motion. En: 2ND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ESG. Vol. 2. Rotterdam. (1998). 619 – 632 p.
- AKAMATSU, K. On microseisms in frequency range from 1 c/s to 200 c/s. En: Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ. Vol. 39. (1961); p. 23-75.
- AKAMATSU, J., M. FUJITA & H. KAMEDA. Long-period (1-10s) microtremor measurement in the areas affected by the 1989 Loma Prieta earthquake. En: PROC. 4TH INT. CONF. ON SEISMIC ZONATION. Stanford, California, aug.25-29. Vol. 1. (1991); p. 393-400.
- AKI, K. Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors. En: Bull. Earthquake. Res. Inst. Tokyo Univ. Vol. 25. (1957); p. 415 – 457.
- AKI, K. Local effects on ground motion. En: EARTHQUAKE ENGINEERING AND SOIL DYNAMICS II – RECENT ADVANCES IN GROUND MOTION EVALUATION

- (jun. 27 – 30). Geotechnical Special Publication. Utah, EEUU. (1988); p. 103 – 155.
- ALFARO, A. Estimación de Períodos Predominantes de los Suelos de Barcelona a partir de Microtremors. Barcelona, 1997, 97 p. M. Sc. Thesis (Ing. Civil), Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España. Informe ICC No. GS091-97.
 - ALLAM A. & E. SHIMA. An investigation into the nature of microtremor ground motion in El Centro, California. En: Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 63. (1967); p. 1227 – 1253.
 - ALVA, J., O. CHAVEZ, W. TANIWANGSA. Estudio de microtrepidaciones en Chimbote y Huaráz. En: Revista TECNIA. Vol. 3. No. 1. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima. (1996); p. 61-74.
 - ARAI, H & K, TOKIMATSU. Microtremor observation in Caracas City, Venezuela. En: The effects of surface geology in seismic motion. En: 2ND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ESG. Vol. 2. Rotterdam. (1998); p 673 –680.
 - BARD P. Y. Microtremor measurements: a tool for site effect estimation? State of the art paper, En: Proc. of 2ND INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF THE EFFECT OF SURFACE GEOLOGY ON SEISMIC MOTION. Yokohamas diciembre 1 al 3, 1998. Vol. 3 (1999) Balkema, 1251-1279.
 - BORCHERDT, R. D. Effects of local geology on ground motions near San Francisco Bay. En: Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 60. (1970); p. 29 – 61.
 - CAMACHO, E. Comunicación personal. Profesor Universidad Nacional de Panamá, Investigador Instituto de Geociencias. Entrevista en noviembre del 2000. Ciudad de Panamá. 2000. Citado en: Rosales 2001.
 - COUTEL, F. & P. MORA. Simulation-based comparison of four site-response estimation techniques. En: Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 88 No. 1. (feb. 1998); p. 30-42.
 - DRAVINSKI, M., T. K. MOSESIAN, H. KAGAMI, & H. ESHARAGI. Predominant motion of the Los Angeles sedimentary basin. En: Eng. Anal. Boundary Elements. Vol. 8. No. 4. (1991); p. 206 – 214.
 - DRAVINSKI, M., G. DING & K.-L. WEN. Analysis of spectral ratios for estimating ground motion in deep basins. En: Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 86. (1996); p. 646 – 654.
 - EUROSEISMOD. Development and Experimental Validation of Advanced Modelling Techniques in Engineering Seismology and Earthquake Engineering, Final Report, Project ENV4-CT96-0255, 1998.
 - FÄH, D., E. RÜTTENER, T. NOACK & P. KRUSPAN. Microzonation of the city of Bassel. En: Journal of seismology. Kluwer Academy Publishers. Belgium. Vol. 1. (1997); p. 87-102.
 - FIELD, E. H & K. H. JACOB. Using microtremors to assess potential site response: a case study in Glushing Meadows, New York City. En: Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 89 No. 6. (1990); p.1456-1480.
 - FIELD, E. H & K. H. JACOB. A comparison and test of various site response estimation techniques, including three that are not reference site dependant. En: Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 85. (1995); p. 1127-1143.
 - FIELD, E. H. & K. H. JACOB. The theoretical response of sedimentary layers to ambient seismic noise. En: Geoph. Res. Lett. Vol. 20. (1993); p. 2925 – 2928.
 - FINN, W. D. L. Geotechnical engineering aspects of microzonation. En: PROC. 4TH INT. CONF. ON SEISMIC ZONATION. Stanford, California, Vol. 1. (1991); p. 199-259.

- GIRALDO, V., A. ALFARO, L.G. PUJADES, J.A. Canas. Estimación de efectos locales con movimientos sísmicos y microtemblores. Monografías de Ingeniería Sísmica. A.H. Barbat, Editor. Monografía CIMNE IS-36, Barcelona. 1999. 77p.
- GOULA, X., T. SUSAGNA, S. FIGUERAS, P. FARRES, X. Cid, A. ALFARO & A. BARCHIESI. Analysis of site effects of city of barcelona (Spain). Resumen en el Libro Resumen En: XIX GENERAL ASSEMBLY OF THE IASPEI. Thessaloliniki. IASPEI, 1997. p. 324.
- GUTIÉRREZ, C. & S. K. SINGH. A site effect study in Acapulco, Guerrero, Mexico: comparison of results from strong-motion and microtremor data. En: Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 82. (1992); p. 642-659.
- HORIKE, M. Inversion of phase velocity of long period microtremors to the S wave velocity structure shown to the base ment in urbanized areas. En: Jour. Phys. Earth, Vol. 33. (1985); p. 59-96.
- HORIKE, M. Studies on microtremors. Resumen en inglés En: Jour. Seism. Soc. Japan, Vol. 64. (1993); p. 343-350.
- HOUGH, S. E., E. H. FIELD, K. H. JACOB. Using microtremors to assess sitespecific earthquake hazard. En : PROC. OF THE FOURTH INT. CONF. ON SEIS. ZONATION. Stanford Univ. California. Aug.25-29, Vol. III. (1991); p. 585-592.
- HUANG, H. C. & S. T. WU. Site effect evaluation in the Yun-Chia-Nan area, Taiwan using H/V ratio. En: The effects of surface geology in seismic otion. En : 2ND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ESG. Vol 2. Rotterdam. 1998. P 681 – 688.
- IBS VON-SEHT, M. & J. WOHLBERG. Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments. En: Bull. Soc. Seism. Am. Vol. 89. (1999); p. 250 – 259.
- INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES GEOLÓGICO MINERAS / INGEOMINAS Y UNIVERSIDAD DEL LOS ANDES. Microzonificación sísmica de Santa Fé de Bogotá. Convenio interadministrativo 01- 92. Reporte final. Ingeominas: Bogotá. 1997. 130 p. il. mapas.
- JARAMILLO, J. D. Comunicación personal. Profesor Universidad EAFIT, Investigador Microzonificación sísmica de Medellín. Noviembre del 2000. Medellín.
- J-SESAME User Manual, Version 1.08 (2004). 17 p.
- KAGAMI, H., C, MARTIN, G. LIANG, Y. Otah. Observation of 1 to 5 second microtremors and their application to earthquake engineering. Part II. Evaluation of site effects upon seismic Wave amplification due to the extremely Deep Soil Deposits. En: Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 72. (1982); p. 987-998.
- KAGAMI, H., S. OKADA, K. SHIONO, M. ONER, M. DRAVINSKI & A. K. MAL. Observation of 1 to 5 second microtremors and their application to earthquake engineering. Part III A two dimensional study of site effects in the San Fernando Valley. En: Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 76, No 6. (1986); p. 1801-1812.
- KAGAWA, T. Estimation of velocity structures beneath Mexico city using microtremor array data. Paper 1179. En: ELEVENTH WORLD CONFERENCE OF EARTHQUAKE ENGINEERING. Acapulco. (1996).
- KANAI, K & TANAKA T. Measurement of microtremor. En: Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ. Vol. 32. (1954); p. 199 –209.
- KANAI, K. & T. TANAKA. On Microtremors VIII. En: Bulletin of the Earthquakes Research Institute, Vol. 39, University of Tokyo. (1961); p. 97-114.

- KANAI, K. The requisite conditions for the predominant vibration of ground. En: Bulletin of the earthquake research institute, Vol 35. Universidad de Tokyo. (1957); p. 457-470.
- KONNO, K. & T. OHMACHI. A smothing function suitable for estimation of amplification factor of the surface ground from microtremor and its pplication. J. JSCE. 525m I – 33, (1995); p. 247 – 259. (en japonés). Citado en: KONNO, K. Amplification factor estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. Paper 1247 En: ELEVENTH WORLD CONFERENCE OF EARTHQUAKE ENGINEERING. Acapulco. (1996).
- KONNO, K. & T. OHMACHI. Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor. En: Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 88. (1998); p. 228-241.
- KUDO, K. Practical Estimates of Site Response. State-of-art Report. En: PROC. 5TH INT. CONF. ON SEISMIC ZONATION. Nice, France. (1995); p. 1878-1907.
- LACHET C. & P-Y BARD. Numerical and theoritical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura´s technique. En: J. Phys. Earth, Vol. 42. (1994); p. 377-397.
- LACOSS, R. T, E. J. KELLY & N. M. TOKSOZ. Estimation of seismic noise structure using arrays. En: Geophysics, Vol. 34. (1969); p. 21 – 38.
- LAY, T. & T. WALLACE. Modern global seismology. Int. Geoph. Series. Academic Press: 1995. 521 p.
- Le BRUN. B., P-Y. BARD, & D. HATZFELD. Evidence for large, low frequency site effects in large alpine Valley: the example of Grenoble, France. En: Libro resumen de la XIX GENERAL ASSEMBLY OF THE IASPEI, Thessaloliniki. (1997); p. 382.
- LERMO, J. & F. CHÁVEZ-GARCÍA. Are microtremors useful in site response evaluation. En: Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 84, No. 5. (oct. 1994); p. 1350-1364.
- LERMO, J., S, Francisco, & J. CHAVEZ-GARCIA. Site effect evaluation using microtremors: a review. Resumen en: EOS Vol. 73. (1992); p. 352.
- MATSHUSHIMA, T. & OKADA. Determination of deep geological structure under urban areas using long period microtremors. En Butsuri Tansa. Vol. 43. (1990); p. 21 – 33.
- MENESES, J. Microtrepidaciones: fundamentos y análisis. En: MEM. SEM. INT. DE MICROZONIFICACIÓN Y SU APLICACIÓN AL PLANEAMIENTO URBANO PARA MITIGACIÓN DE DESASTRES. JICA – CISMID 19 al 21 de julio. CISMID: Lima, Perú, (1991); p. 80 – 104.
- MUCCARELLI, M. Reliability and applicability of Nakamuras technique using microtremrs: an experimetnal approach. En: J. of Earth. Eng. Vol 2, No. 4, Imperial College Press. (1998); p. 525-638.
- NAKAMURA, Y. Clear identification of fundamental idea on Nakamura´s tecnique and its applications. Paper No. 2656 En: Proc. of 12TH WORLD CONFERENCE IN EARTHQUAKE ENGINEERING. Nueva Zelanda. (2000). 8p.
- NAKAMURA, Y, K. TOMITA & J. SAITA. Characteristics of ground motion and structures around the damaged area of the Northridge earthquake by microtremor measurement (preliminary report ver.2). Rail Technical Research Institute, Tokyo. 1994.
- NOGOSHI, M. & T. IGARASHI. On the amplitud characteristics of microtremor (Part 2). Resumen en inglés En: Jour. Seism. Soc. Japan, Vol. 24. (1971); p. 26-40
- OHMACHI, T & T. UMEZONO. Rate of Rayleigh waves in microtremors. En: The effects of surface geology in seismic motion. En: 2ND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ESG. Vol. 2. Rotterdam. (1998); p. 587 – 592.

- OHMACHI, T., K. KONNO, T. ENDOH & T. TOSHINAWA. Refinement and application of an estimation procedure for site natural periods using microtremor. Resumén en Japonés. JSCE, 489, 1-27. (1994); p. 251-260. Citado por: TOSHINAWA, T., J. B. BERRIL & R. O. DAVIS. Ground motion characteristics of Christchurch, New Zealand, obtained by microtremor measurements. En: Proc. 9TH. INT. CONF. JAPAN. EARTHQUAKE ENG. SYMP. Vol. 2. (1994); p. 79 – 84
- OHMACHI, T., Y. NAKAMURA, and T. TOSHINAWA. Ground motion characteristics in the San Francisco Bay area detected by microtremor measurements. En: Proc. 2ND INT. CONG. ON RECENT ADV IN GEOT. EARTH ENG. AND SOIL DYN. 11-15 march, St Louis, Missouri. (1991); p. 1643-1658.
- OMORI, F. On microtremors. Boletín del Eartquake Investigation Committee, Vol 2. 1908. p.1-6. Citado en: UDÍAS, A & J. MEZCUA. Fundamentos de sismología. Instituto Geográfico Nacional de Madrid. UCA editores: El Salvador, San Salvador, 1996. 200 p.
- OTAH, Y. H., KAGAMI, N. GOTO & K. KUDO. Observation of 1 to 5 secod microtremors and their application to earthquake engineering, Part I: Comparison with long-period accelerations at the Tokachi-Oki earthquake of 1968. En: Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 68. (1978); p. 767-779.
- PHILLIPS, W. S & K. AKI. Site amplification of coda wave from local earthquakes in central California. En: Bull. Seism. Soc. Am. 76. 1986. 627-648.
- PITILAKIS, K. Evaluation of site response estimation method based on Euroseitest data. Resumen En: Libro resumen de la XIX GENERAL ASSEMBLY OF THE IASPEI, Thessaloliniki. (1997); p. 318.
- RANDALL, R. B. & B. A. Tech. Frequency analysis. K. Larsen & Sons: Dinamarca, 1987. 344 p.
- RIEPL, J., P.-Y BARD, D. HATZFELD, C. PAPAIOANNOE & S. NECHTSCHIEIN. Detailed evaluation of site-response estimation methods across and along the Sedimentary Valley of Volvi (EURO-SEIStest). En: Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 88. No 2. (apr. 1998); p. 488-502.
- SAFAK, E. Problems with using spectral ratios to estimate site amplificaciont. Proc. Of the fourth international conference on seismic zonation, EERI (Edit.), Oakland. Vol. 2. (1991); p. 277-284.
- SEO, K., T. SAMAN, H. YAMANKA, X. HAO, S. KOYAMA, M. TAKEUCHI, KFUJIOKA, Y. KISHINO, K. KAWANO, K. ASANO, N. NAKAJIMA, M. MURAI, L. MUALCHIN, & Y. HISADA. Microtremor measurements in the San Francisco Bay Area: Part 1 Fundamental Characteristics of microtremors. En: PROC. 4TH INT. CONG. ON SEISMIC ZONATION. Vol. 2. (1991); p. 417-432.
- SEO, K. A joint work for measurements of microtremors in the Ashigara valley. En: INT. SYMP. EFFECTS OF SURF. GEOL. ON SEISMIC MOTION, ESG. Odawara, Japan, Vol. 2. (1992); p. 43-52.
- SESAME (Site Effects Assessment Using Ambient Excitations: Project No. EVG1-CT-2000-00026), GUIDELINES FOR THE IMPLEMENTATION OF THE H/V PECTRAL RATIO TECHNIQUE ON AMBIENT VIBRATIONS MEASUREMENTS, PROCESSING AND INTERPRETATION. (2004); p. 1-62
- SOMERVILLE, M.R., H. KAGAMI & K. F. MCCUE. Seismic amplification determined from microtremor monitoring at alluvial and rock sites in Newcastle. En: Bulletin of the New Zeland National Society for Earthquake Engineering. Vol. 26, No. 2. (june, 1993). p. 175-184.

- STÅL, F. & G. WESTBERG. Microzonation study in Managua. Manuscript of master of science thesis, septiembre de 1996. Royal Institute of Technology. Stockholm 1996. 107p.
- SUZUKI, T., T. ADACHI & M. TANAKA. Application of microtremor measurements to the estimation of earthquake ground motions in Kushiro city during the Kushiro-Oki earthquake of 15 January 1993. En: Earthquake Eng. Struct, Dyn, Vol. 24. (1995); p. 595-613.
- TABER, J. J. & C. M. Clithoreo. Comparison of site response determined from strong motion, weak motion and microtremors in the Wellington region, New Zealand. En: FALL MEETING 1996 San Francisco California. Diciembre 15 al 19 de 1996.
- THEODOLIUS, N. & P.-Y. Bard. Horizontal to vertical spectral ratio and geological conditions: an analysis of strong motion data from Greece and Taiwan (SMART – 1). En: Soil Dyn. and earthquake engineering, Vol. 14. (1995); p. 177-197.
- TOKEHSHI, J. C., Y. SUGIMARA; & T. SASAKI. Assesment of natural frequency from microtremor measurement using phase spectrum. Paper No. 309 En: 11 World Conference on Earthquake Engineering. 1996.
- TOKSOZ N. M. Microseisms and attempted applications. En: Geophysics. Vol. 39. (1964); p. 154 – 177.
- TOSHINAWA, T., J. B. BERRIL & R. O. DAVIS. Ground motion characteristics of Christchurch, New Zealand, obtained by microtremor measurements. En: Proc. 9TH. INT. CONF. JAPAN. EARTHQUAKE ENG. SYMP. Vol. 2. (1994); p. 79 – 84.
- TOSHINAWA, T., J. J. TABER & J. BERRILL. Distribution of ground motion intensity inferred from questionnaire survey, earthquake recording, and microtremor measurements – a case study in Christchurch, New Zealand, during the 1994 Arthurs Pass Earthquake. En: Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 87. (1997); p. 356 – 369.
- TRIANTAFYLLIDIS, P. & P. M. HATZIDIMITRIOU. Site effects in the city of Thessaloliniki (Greece) using acceleration data. Resumen en Libro Resumen de la XIX GENERAL ASSEMBLY OF THE IASPEI., Thessaloliniki. (1997); p. 319.
- UDWADIA. F. E & M. D. TRIFUNAC. Reply. En: Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 64. (1974); p. 496.
- UNIVERSIDAD DE LOS ANDES / UNIANDES. Proyecto microzonificación sísmica preliminar de la ciudad de Armenia, Quindío. Informe definitivo. Julio de 1997. UNIANDES: Bogotá, 1997. 50 p. il., mapas, anexos.
- WAKAMATSU, K. & Y. YASUI. Possibility Of Estimation For Amplification Characteristics Of Soil Deposits Based On Ratio Of Horizontal To Vertical Spectra Of Microtremors. En: Jour. Struc. Constr. AIJ. Vol. 471. (1995); p. 61- 70.
- ZASLAVSKY, Y & A. SHAPIRA. Earthquake zonation map for Eilat (Israel) – Predictions and observations. Resumen en el Libro Resumen En: XIX GENERAL ASSEMBLY OF THE IASPEI. Thessaloliniki. (1997); p. 322.

BIBLIOGRAFÍA CAPITULO 6

- GIRALDO, V., A. ALFARO, L.G. PUJADES, J.A. Canas. Estimación de efectos locales con movimientos sísmicos y microtemblores. Monografías de Ingeniería Sísmica. A.H. Barbat, Editor. Monografia CIMNE IS-36, Barcelona. 1999. 77p.
- J-SESAME User Manual, Version 1.08 (2004)
- Operator's guide. CMG-40T Triaxial Broadband Seismometer. Güralp Systems Aldermaston RG7 8EA U.K. 2004. p. 29

- Orion Manual. Nanometrics Inc. Canada K2K 2A1. 1998. p. 95
- Playback Manual Orion. Nanometrics Inc. Canada K2K 2A1. 1998. p. 31,60,61
- ROSALES CLIMENT, Cristina. Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia. Cali, 2001, 275 p. Trabajo de grado (Ingeniera Civil). Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática.
- SAFAK, E. Problems with using spectral ratios to estimate site amplification. Proc. Of the fourth international conference on seismic zonation, EERI (Edit.), Oakland. Vol. 2. (1991); p. 277-284.
- User Guide. Etna Digital Recorder. Kinometrics, Inc. Switzerland. 2002. p. 118-121, 51-52

BIBLIOGRAFÍA CAPITULO 7

- AMBRASEYS N., P. SMIT, R. BERARDI, D RINALDIS, F. Cotton and C. Berge-Thierry (2000); Dissemination of European Strong-Motion Data. CD-ROM collection. European Council, Environment and Climate Research Programme.
- CARREÑO, E. et al.(1999). Física de la tierra: registro y tratamiento de acelerogramas. Servicio de publicaciones, Universidad Complutense, Madrid, pp. 81-111.
- CORAL MONCAYO, Hugo. Utilización de métodos experimentales y de simulación numérica para la microzonificación sísmica de áreas urbanizadas en Andorra. Barcelona, 2002. p. 58,59. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. E. T. S. Ingenieros de Caminos, C. y P. Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica.
- SCHNABEL, P.B., LYSMER, J., and SEED, H.B. (1972). "SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites," Report No. EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- ProShake User's Manual. Ground Response Analysis Program Version 1.1. EduPro Civil Systems, Inc. Redmond, Washington. 1991. 52 p

BIBLIOGRAFÍA CAPITULO 8

- NORMAS COLOMBIANAS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SISMO-RESISTENTE NSR-98. Bogotá: Cuarta edición, marzo 2003.
- ECHEZURÍA, Heriberto. Diseño Sismorresistente, especificaciones y criterios empleados en Venezuela – Volumen XXXIII, Academia de Ciencias Físicas Matemáticas y naturales. 1997. 91 p.
- OTALVARO CALLE, Iván Fernando. et al. Efecto de la meteorización en las propiedades dinámicas de un suelo grabróico. En: Universidad de EAFIT, vol. 40, número 133. Medellín Colombia. 2004. 130 p.
- CABRERA, E. A. et al. Función de Transferencia sísmica de los suelos volcánicos endurecidos de la ciudad de Pasto. En: Revista Colombiana de física, vol. 34, número 1. 2002. 269 p.

BIBLIOGRAFIA CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- NORMAS COLOMBIANAS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SISMO-RESISTENTE NSR-98. Bogotá: Cuarta edición, marzo 2003.

- ALFARO, A. Estimation of S/wave velocity structure Using arrays of long period microtremors. Individual Studies by Participants at the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering. Building Research Institute. Tsukuba Japan, Vol. 41. En imprenta. 2005 b.
- HAYASHI, K. Active and Passive Surface Waves. International Institute of Seismology and Earthquake Engineering. Lecturs Notes. 2005. 25pp.
- HORIKE, M. Inversion of Phase Velocity of Long-Period Microtremors to the S-Wave Velocity Structure down to the basement in urbanized areas. Journal of the Physics of the Earth, 33. 1985. 59-96 p.
- TOKIMATSU, K. Geotechnical site characterization using surface waves. Earthquake Geotechnical Engineering, Ishihara (Ed.) Balkema, Rotterdam. 1997
- YAMAMOTO, H. An experiment for estimatinf S-Wave velocity structure from phase velocities or Love and Rayleigh waves in microtremores. The Effects or Surface Geology on Seismic Motion, Irikura, Kudo, Okada and Sasatani (Eds.), Balkema, Rotterdam, The Netherlands. 1998. 705-710 p.
- FLORES-ESTRELLA, H., AGUIRRE-GONZALES, J. Método SPAC: Otra alternativa para estimar el efecto de sitio en la Ciudad de México. Memorias Técnicas del XIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Guadalajara, Jalisco, México. 2001.
- LIU HSI-PING, BOORE, D. M., JOYNER, W. B., OPPENHEIMER, D.H., WARRICK,R. E., ZHANG, W., HAMILTON, J.C. and BROWN, L. T. Comparison of Phase Velocities from Array Measurements of Rayleigh Waves Associated with Microtremor and Results calculated from Borehole Shear-Wave Velocity Profiles. Bulletin of the Seismological Society or America, 90,3. 666-678 p.
- RODRIGUEZ, M., CHAVEZ-GARCIA, F. and STEPHENSON, B. Stationarity of seismic noise and SPAC. Results or a new approach. Pacific Conference on Earthquake Engineering. 2003.
- FLORES-ESTRELLA, H. Método SPAC: Una alternativa para la estimación de Modelos de Velocidades en el Valle de México. México, 2004. Tesis de Maestria, Posgrado den Ciencias de la Tierra. Instituto de Geofísica, UNAM.
- CHAVEZ-GARCIA, F.J. and CUENCA J. Site Effects and Microzonation in Acapulco. Earhquake Spectra 14. 2005. 75-93 p.
- CAPON, J. High-resolution frequency-wave number spectrum analysis. Proceedings, IEEE, 57-8. 1969. 1408-1418 p.

ANEXOS

- Anexo 1.** Entorno gráfico de consulta resultados obtenidos (HTML). Ejecutable en CD.